INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
Agosto 2014 InvestigacionyCiencia.es
Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

MATERIALES
Cuasicristales de origen extraterrestre

FÍSICA
Más allá del modelo estándar

MICROBIOLOGÍA
Contraataque a las bacterias resistentes

NEUROCIENCIA DE LOS HÁBITOS

Cómo se fijan las rutinas en nuestros circuitos neuronales

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
NEUROCIENCIA DE LOS HÁBITOS | RESISTENCIA BACTERIANA | CUASICRISTALES EXTRATERRESTRES
N.º 455
AGOSTO 2014

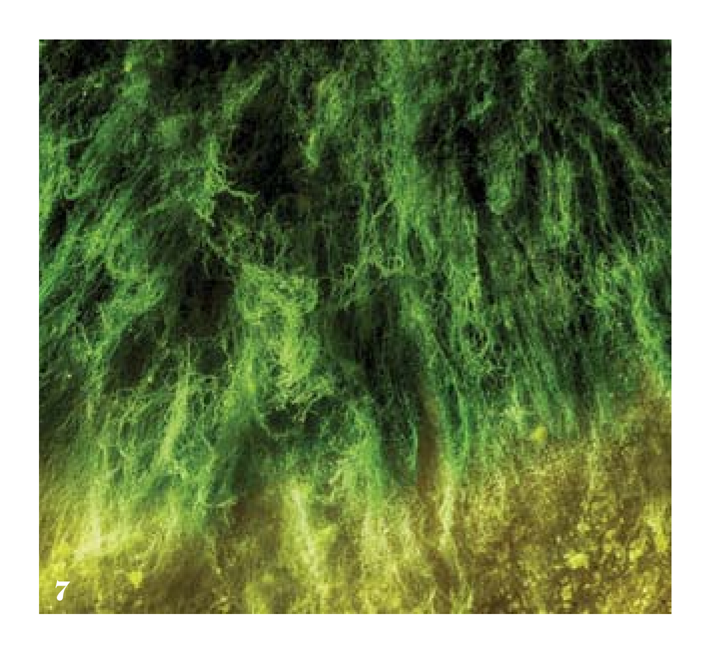


6,50 EUROS



CORTESÍA DE NASA/JPL

ARTÍCULOS


7

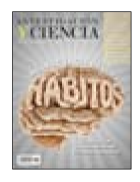

8


48

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA



Adquirir buenos hábitos y desprenderse de los malos puede resultar difícil. Los neurocientíficos están revelando el modo en que se fijan o eliminan los hábitos en ciertas regiones del cerebro. Este conocimiento podría dar lugar al desarrollo de trucos simples, nuevas terapias conductuales o medicamentos que nos ayuden a comer más vegetales o a dejar de mordernos las uñas. Ilustración de FOREAL.

redaccion@investigacionyciencia.es



Marzo y mayo 2014

HUMANOS CONTRA CARNÍVOROS

El artículo «El rey de los animales» [por Lars Werdelin; Investigación y Ciencia, enero de 2014] establece una interesante conexión entre la aparición de los primeros miembros del género *Homo* en África, hace unos dos millones de años, y la reducción del número de especies de grandes carnívoros que, hacia la misma época, experimentó ese continente. ¿Qué ocurrió con la diversidad de grandes carnívoros en aquellas regiones del mundo a las que el ser humano llegó mucho más tarde, como Norteamérica?

David Smith
San Juan de Terranova (Canadá)

Responde Werdelin: *Cada continente está caracterizado por una historia natural, un entorno y un momento de llegada del género* Homo *propios, por lo que cada zona debe considerarse por separado.*

En general, en la mayor parte del mundo existen indicios que avalan una merma en la diversidad de grandes carnívoros coincidente con la aparición de Homo. *En el caso del continente Americano, durante décadas se ha debatido si las extinciones del Pleistoceno tardío fueron provocadas por el clima o por el ser humano. La respuesta probablemente se halle en una combinación de ambos factores, incluida una cascada trófica causada por una extinción de grandes carnívoros mediada por la intervención humana.*

En Europa, la diversidad de grandes carnívoros parece haber menguado hacia la época de los primeros asentamientos permanentes de Homo, *hace unos 800.000 o 700.000 años, si bien la conclusión definitiva dependerá del resultado de las investigaciones futuras. La situación en Asia es incierta, ya que existen muy pocas localizaciones bien datadas pertenecientes al período de interés (hace entre 1,8 y 1,5 millones de años).*

SIMULACIÓN CELULAR MÍNIMA

En «Simulación de una célula viva» [por Markus W. Covert; Investigación y Ciencia, marzo de 2014] se describe el primer modelo computacional capaz de simular un organismo unicelular completo, la bacteria *Mycoplasma genitalium*.

Una vez lograda esa hazaña, ¿sería posible ir desactivando cada uno de sus 525 genes, a fin de comprobar cuál es el número mínimo de ellos que el organismo simulado necesita para dividirse? Tal vez este método permitiese investigar si en el pasado existieron organismos aún más simples, al tiempo que proporcionaría una posible vía para estudiar el origen de la vida.

Gordon Lee

Responde Covert: *Somos varios los investigadores que en estos momentos nos estamos preguntando cómo proceder para borrar genes y hallar nuevas cepas viables que, sin embargo, posean menos material genético que* M. genitalium.

El problema reviste un gran interés por varias razones. Por un lado, existen muchas posibles soluciones. Por otro, el orden importa: cada bloqueo de un gen desencadena sus propias consecuencias, por lo que, en ocasiones, es necesario eliminar cierto gen antes de suprimir otro, ya que de lo contrario la célula muere. Con todo, esperamos que nuestros modelos nos ayuden a encontrar la mejor manera de proceder. A partir de ahí, tal vez podamos producir un nuevo diseño celular.

Uno de los obstáculos principales se debe a que cada simulación (un ciclo de división celular completo) consume unas 10 horas, por lo que ejecutar el número necesario de simulaciones plantea un reto computacional de primer orden. Con suerte, quizá tengamos una respuesta dentro de unos años.

INSECTOS FISONOMISTAS

En «Reconocimiento facial en insectos» [por Elizabeth A. Tibbetts y Adrian G. Dyer; Investigación y Ciencia, mayo de 2014] se explica que algunos insectos, como las avispas papeleras y las abejas melíferas, son capaces de reconocer los rostros de otros miembros de su especie. ¿Se han observado diferencias entre sexos en lo referente a dicha capacidad para distinguir rostros?

Dennis Weber
Kalamanzoo, Michigan

Responden Tibbetts y Dyer: *Probablemente sí existan diferencias entre sexos, aunque para establecerlas aún habremos de llevar a cabo los experimentos pertinentes. En los insectos, las facultades perceptivas complejas, como la distinción del color, suelen variar tanto de una especie a otra como entre los individuos de una misma especie. En el caso concreto de las abejas y las avispas, es de esperar que existan diferencias entre sexos, ya que machos y hembras desempeñan roles sociales muy distintos. En la actualidad estamos ideando experimentos que nos permitan abordar la cuestión.*

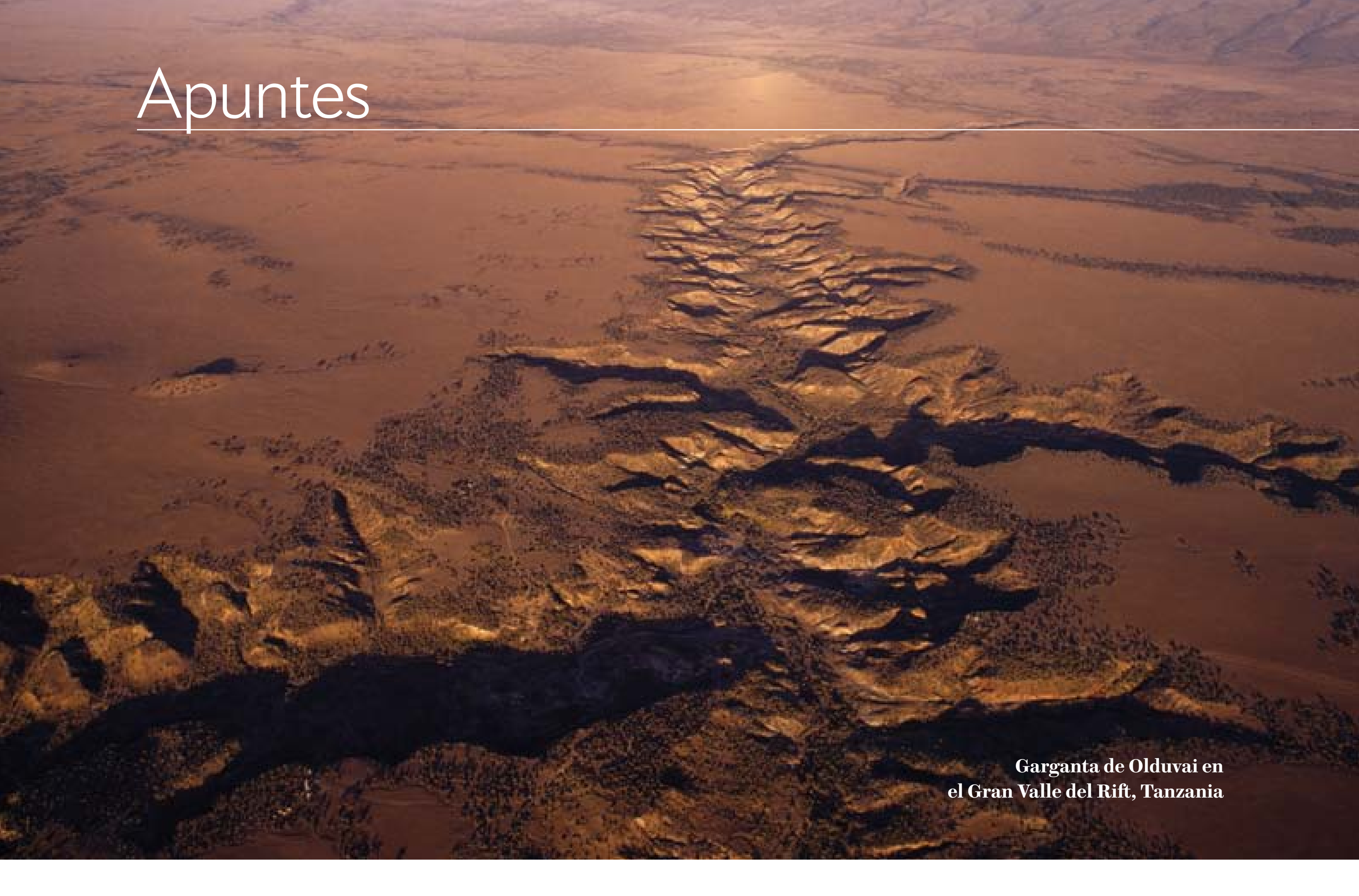
Errata corrige

En el artículo **Basura en el lecho oceánico** [Investigación y Ciencia, julio de 2014] debe sustituirse la última frase por «Además, una acumulación de plásticos sobre el fondo puede acarrear hipoxia o incluso anoxia a los organismos sésiles o de escasa movilidad que quedan cubiertos y atrapados por estos materiales, lo cual puede interferir en el funcionamiento y estructura de las comunidades y del ecosistema bentónico.»

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



Garganta de Olduvai en el Gran Valle del Rift, Tanzania

CIENCIAS DE LA TIERRA

La gran divisoria de África

África se está partiendo en dos. La razón: una falla geológica se abre a lo largo del este del continente, donde dentro de muchos millones de años habrá un mar. Hace decenios que se debate sobre qué está produciendo esta separación de placas tectónicas. Los geofísicos creían que la causa era una superpluma, una gigantesca columna dentro del manto terrestre que lleva calor desde cerca del núcleo hasta la corteza. Daban como prueba dos grandes mesetas (una en Etiopía, la otra en Kenia) que, decían, se crearon porque una superpluma empujó el manto. Los geoquímicos, que no han podido confirmar esta teoría, creían, en cambio, que debía de haber dos plumas pequeñas y sin relación entre sí, cada una de las cuales empujaba a su meseta. Estas dos teorías no casaban. Como dice David Hamilton, geoquímico de la Institución Scripps de Oceanografía en La Jolla, California, «había una discrepancia entre la química y la física».

En 2006 y 2011 Hilton marchó al este de África para ver si podía zanjar la discusión. Para determinar cómo se creó la falla, decidió con sus colaboradores que se valdrían de los gases que emanan de ella. Protegidos con máscaras, ascendieron hasta lo más alto de los volcanes de Tanzania y se introdujeron en los *mazuku* («malos vientos» en suajili), unas fumarolas geotérmicas y depresiones donde se acumulan gases letales que a menudo matan a pájaros y mamíferos. Allí recogieron muestras de rocas depositadas durante las erupciones; entre ellas había olivinos, cristales que, como si fueran botellas, encierran gases volcánicos.

De vuelta a California, Hilton trituró las rocas en el vacío para que soltasen los gases. Buscaba helio 3, un isótopo que se hallaba presente cuando el planeta se formó y quedó atrapado en el núcleo terrestre. Pensaba que, si en las mesetas etíope y keniata había rocas que contuviesen ese gas primordial, al menos quedaría confirmado que las crearon plumas. Las lecturas mostraron que, en efecto, ambas contenían helio 3. Pero ello no aclaraba si una sola pluma lo hizo todo o si fue obra de un par de plumas más pequeñas.

Para averiguarlo, los investigadores se fijaron en otro gas primordial atrapado en el manto: el neón 22. Lo hallaron en las dos mesetas, y las razones entre helio y neón de ambas coincidían, como publicaron en abril en *Geophysical Research Letters*. El material de las plumas subyacentes a una y a la otra era, pues, el mismo y de la misma edad. Por tanto, solo había una superpluma común a ambas y la razón la habían tenido siempre los geofísicos.

«Los del "que no, que no y que no", empeñados en la inexistencia de conexión entre la falla y las plumas —y algunos que negarían incluso que haya una pluma—, ya no tienen en qué basarse», comenta Pete Burnard, geoquímico del Centro Nacional de Investigaciones Científicas de Francia, que no participó en estos trabajos.

La superpluma africana hará más accesible el estudio de lo que ocurre en las entrañas de la Tierra (otra se encuentra bajo el océano Pacífico). Hilton y su equipo están midiendo ahora cuánto carbono está desprendiendo el manto en el este de África, su antigüedad y si se ha reciclado a partir de carbono apresado en la corteza originalmente, hace miles de millones de años. Esta información arrojará luz sobre las interacciones entre las capas de la Tierra a lo largo de escalas de tiempo mucho más largas, como los cientos de millones de años que tarda en formarse un continente. O en partirse.

—Erin Biba

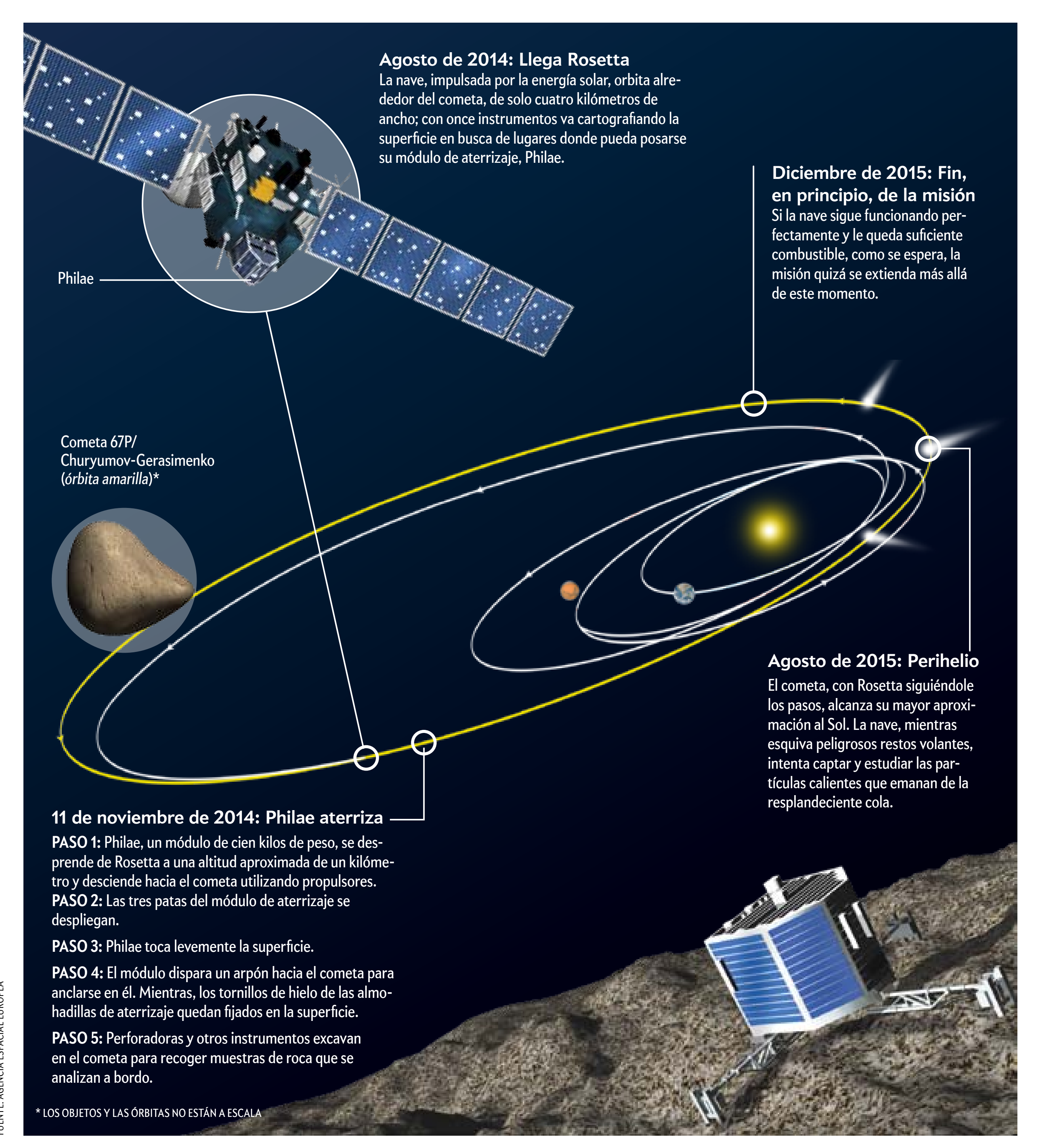
EMORY KRISTOF, *NATIONAL GEOGRAPHIC*

ESPACIO

Cita con un cometa

La nave Rosetta, de la Agencia Espacial Europea, lleva diez años volando hacia su destino, el cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko. Este mes llega por fin allá. Se cree que los cometas son los ladrillos con que se hizo el sistema solar; si se estudia uno de cerca se sabrá más, pues, de estos materiales de la construcción planetaria. Rosetta enseñará también cómo se forma la cola de los cometas al observar a este en concreto mientras desprende polvo y gas al acercarse al Sol. Pero solo será posible si el módulo de aterrizaje logra algo que nunca antes se ha intentado: posarse en un cometa lanzado a través del espacio.

—Clara Moskowitz



FUENTE: AGENCIA ESPACIAL EUROPEA

AGRICULTURA

Amigos de las hojas



El proyecto del Microbioma Humano sacó a relucir los billones de microorganismos que habitan en el cuerpo humano. Ahora ha llegado el momento de censar los microbios vegetales, y no solo los miles de millones que medran en el suelo. El interior de las raíces, las hojas y las flores albergan comunidades microbianas peculiares; se ha calculado que en conjunto su diversidad genética supera en de tres a seis órdenes de magnitud la de sus anfitrionas. A semejanza del microbioma humano, este segundo genoma suministra nutrientes a las plantas y las ayuda a combatir las enfermedades. Científicos y agricultores están convencidos de que será el próximo gran avance para la agricultura [*véase* «Tierra prodigiosa», por Richard Conniff; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre de 2013].

Apenas hemos comenzado a desentrañar las interacciones entre las plantas y los microbios. Sin ir más lejos, Jeff Dangl, inmunólogo vegetal de la Universidad de Carolina del Norte en Chapel

NEUROCIENCIA

Por qué olvidan los niños pequeños

No resulta difícil recordar sucedidos de hace muchos años (cumpleaños, graduaciones, visitas a la abuela). Pero ¿quién se acuerda de cuando era un niño pequeño? Desde hace más de un siglo se intenta descubrir la causa de la «amnesia infantil». Sigmund Freud la veía en la represión de las experiencias sexuales tempranas, idea hoy desacreditada. En fecha más reciente, se ha atribuido a que los niños carezcan de la percepción de sí mismos, o de lenguaje, o de algún otro equipamiento mental necesario para codificar los recuerdos.

Los neurocientíficos Paul Frankland y Sheena Josselyn, del Hospital de Niños Enfermos de Toronto, no creen que lo lingüístico o el sentido de uno mismo ofrezcan tampoco una buena explicación. Los humanos no son los únicos que experimentan la amnesia infantil: los ratones y los monos olvidan también su primera infancia. Para explicar esta semejanza, Frankland y Josselyn tienen otra teoría: el rápido nacimiento de muchas neuronas nuevas en el cerebro infantil bloquea el acceso a los viejos recuerdos.

En un nuevo experimento, manipularon el ritmo al que proliferan las neuronas del hipocampo en ratones jóvenes y adultos. El hipocampo es la región cerebral que registra los acontecimientos autobiográficos. Los ratones infantiles a los que se les refrenaba la formación de neuronas mostraban mejor memoria a largo plazo. Por el contrario, los ratones de mayor edad, a los que se les aumentaba, sufrían la desmemoria.

Basándose en esos resultados, publicados en *Science* en mayo, Frankland y Josselyn piensan que la rápida formación neuronal en la primera niñez perturba los circuitos cerebrales que guardan los recuerdos antiguos, que así se vuelven inaccesibles. Los niños pequeños no tienen, además, desarrollada aún del todo la corteza prefrontal, otra región del cerebro que codifica recuerdos, de modo que la amnesia infantil quizá sea una combinación de estos dos factores.

Conforme envejecemos, la neurogénesis se frena y el hipocampo alcanza un equilibrio entre la formación y la retención de recuerdos. Claro está, seguimos olvidando mucho, pero quizá sea bueno. «La triste verdad es que la mayor parte de lo que hacemos en la vida es bastante prosaico», comenta Frankland. «Esta es la idea: para una sana memoria adulta se requiere no solo que se pueda recordar, sino también borrar los recuerdos sin importancia». Como todo ese dormir, llorar y gatear. ¿Quién tiene necesidad de acordarse de ello?

—*Annie Sneed*

NIGEL CATTLIN, GETTY IMAGES (*planta*); THOMAS FUCHS (*ilustración*); CORTESÍA DE DAVID PEASLEY (*moho*); MUSEO DE CIENCIAS NATURALES DE LONDRES (*mamut*)

Hill, y sus colaboradores han descubierto hace poco que las bacterias del suelo influyen en la época de floración de una planta silvestre de la familia de la mostaza. Las conclusiones se publicaron en *Ecology Letters* el pasado junio. En 2012 descubrieron la sorprendente abundancia de estreptomicetos presente en las plantas. Estas bacterias son importantes sintetizadoras de antibióticos que podrían proteger las plantas de las infecciones. En resumen, Dangl y otros expertos creen que conocer estas relaciones íntimas es fundamental para mejorar la productividad agrícola ante la creciente demanda de alimentos.

Las empresas del sector agrícola opinan igual. En los últimos dos años BASF, Bayer CropScience, Chr. Hansen, Novozymes, Monsanto y numerosas empresas noveles han invertido cerca de dos mil millones de dólares en investigación y desarrollo en el campo. La mayoría están trabajando en los llamados productos biológicos-vivos. Tom Johnson, quien en fecha reciente ha vendido su empresa de Dakota del Sur TJ Technologies a Novozymes, desarrolló QuickRoots, un recubrimiento para semillas a base de bacterias y hongos que estimula el crecimiento de las raíces.

Los microorganismos también pueden servir para combatir las plagas con mayor rapidez que la mejora tradicional y la modificación genética, así como para reducir las aplicaciones excesivas de abonos. Thomas Videbæck, vicepresidente ejecutivo de Novozymes, opina que las aplicaciones de microorganismos no serán tanto un sustituto como un complemento de los métodos tradicionales. «Ninguna de estas técnicas hace milagros», asegura, «pero necesitamos soluciones para duplicar la producción de alimentos y nutrir a 9000 millones de personas». A principios de este año, Novozymes anunció la construcción de un centro en el Research Triangle Park de Carolina del Norte destinado a la fabricación de cócteles microbianos que actuarán a modo de plaguicidas y promotores del crecimiento vegetal. Esta y otras empresas aguardan expectantes los frutos que el microbioma vegetal puede deparar para el campo. —*Peter Andrey Smith*

¿QUÉ ES ESTO?



«Tenía una bolsa de magdalenas que llevaba demasiado tiempo en el armario.» En vez de tirarlas, David Peasley, de Alamosa, en Colorado, Estados Unidos, dejó que creciese el moho y se extendiese para luego tomar esta foto. Según Kathie Hodge, micóloga de la Universidad Cornell, el hongo debía de ser una especie de *Penicillium*. «No podemos estar seguros», matiza, «pero el color azulverdoso de la colonia, con los bordes blancos y los pequeños pompones, concuerda con las señas de identidad de *Penicillium*, sobre todo si ha crecido sobre pan». Además de en el pan, *Penicillium* suele hallarse en interiores sobre las alfombras y el papel pintado. Ciertas especies pueden provocar alergias en la piel e incluso la muerte; otras sirven para elaborar quesos y obtener penicilina. —*Amber Williams*

AGENDA

EXPOSICIONES

Talleres Galileo. 150 años de historia y tecnología
Museo Galileo
Florencia
exhibits.museogalileo.it/officinegalileo

La voz. La exposición que os habla
Ciudad de las Ciencias y de la Industria
París
www.cite-sciences.fr

La química en el ocio y el deporte
Deustches Museum
Múnich
www.deutsches-museum.de

Maria Skłodowska Curie: Una polaca en París
Museo Nacional de Ciencias Naturales
Madrid
www.mncn.csic.es

Mamuts
Museo de Historia Natural
Londres
www.nhm.ac.uk



OTROS

Del 3 al 16 de agosto – Encuentro
Cosmología moderna: Universo primitivo, CMB y LSS
Centro de Ciencias de Benasque Pedro Pascual, Benasque
benasque.org/2014cosmology

5 y 6 de agosto – Torneo de ciencia escénica
I Science Slam Festival
Museo Es Baluard
Palma de Mallorca
scienceslammallorca.blogspot.com

Del 5 al 14 de agosto
Asamblea general y congreso de la Unión Cristalográfica Internacional
Montreal
www.iucr2014.org

Del 23 de agosto al 4 de octubre - Curso
Tecnología de la información y la comunicación en la educación
Universum Museo de las Ciencias de la UNAM
México, D.F.
www.universum.unam.mx > Lo nuevo

GEOLOGÍA

Erosión por enfriamiento

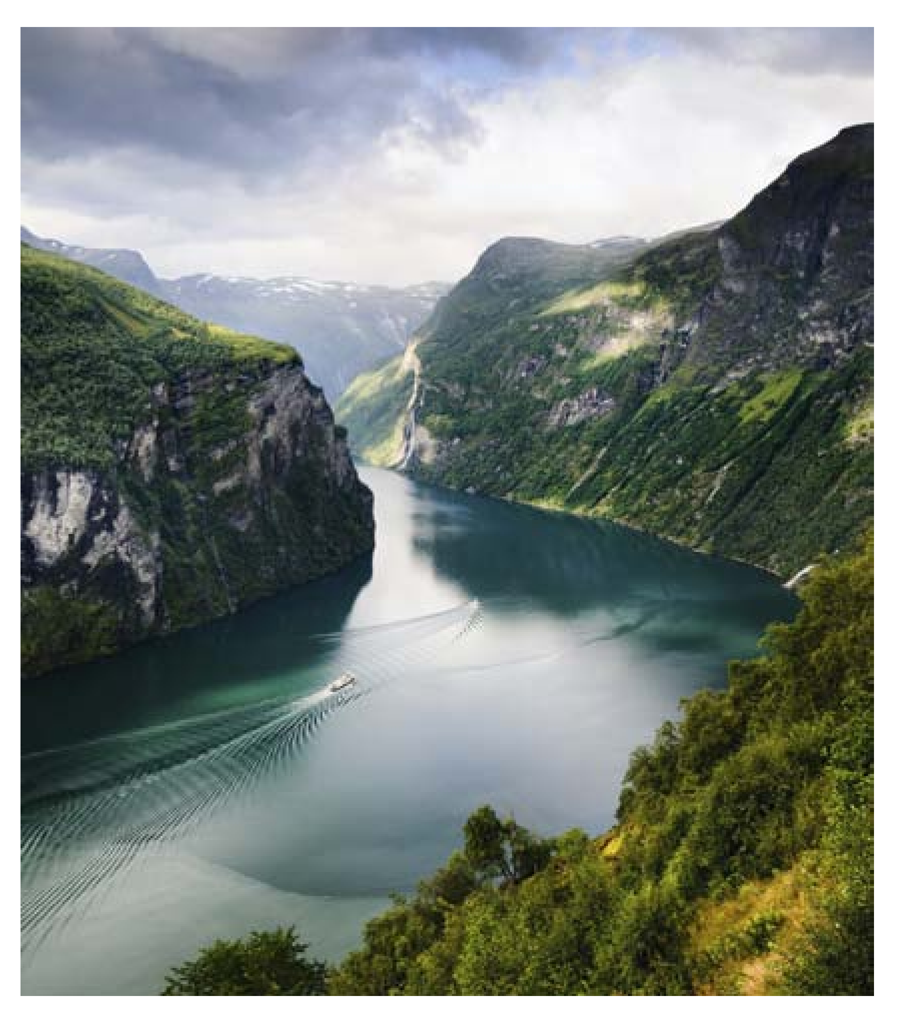
La historia térmica de miles de rocas avala la idea de que el enfriamiento climático de los últimos millones de años aceleró la erosión de la superficie terrestre

DAVID LUNDBEK EGHOLM

Según un estudio publicado hace unos meses en *Nature* por Frédéric Herman, de la Universidad de Lausana, sobre la tasa de erosión de varias cadenas montañosas, el enfriamiento global acontecido a lo largo de los últimos seis millones de años aceleró la degradación de las cordilleras. Sus resultados reavivan un largo debate que vincula clima, topografía y tectónica de placas.

La elevada topografía de las cadenas montañosas responde a la lenta colisión entre placas continentales, gobernada a su vez por la dinámica de la tectónica de placas. Por otro lado, la erosión ejercida por ríos, glaciares y deslizamientos contrarresta los procesos de formación de montañas, ya que desmenuza el sustrato rocoso y transporta los sedimentos resultantes hacia regiones de menor altitud, como las cuencas sedimentarias o los océanos. Así pues, la estructura de las cadenas montañosas obedece a un complejo balance de procesos constructivos y destructivos.

Por más que hoy podamos medir los cambios topográficos recientes mediante el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), averiguar lo acontecido en el pasado y obtener datos que abarquen las enormes escalas de tiempo asociadas supone una meta muy ambiciosa. Por ello, la influencia que ejerce el clima en los procesos erosivos y, por tanto, en la elevación y la morfología de las cadenas montañosas constituye aún un misterioso interrogante.



ESCULPIDOS POR GLACIARES: Un estudio reciente ha demostrado que los procesos erosivos, como los que moldearon los fiordos noruegos (en la imagen, Geirangerfjord) se han acelerado en todo el planeta durante los últimos seis millones de años.

Cronómetros térmicos

Hace unos seis millones de años, el clima terrestre entró en una pronunciada fase de enfriamiento que provocó glaciaciones tanto en cadenas montañosas elevadas como en latitudes altas. A comienzos del Cuaternario (el período que comprende los últimos 2,6 millones de años) se expandieron vastas masas de hielo. Desde hace tiempo, los expertos parecen convenir en que el volumen de sedimentos acumulados en los océanos a lo largo de los últimos millones de años supera de largo al volumen estimado para otros períodos de duración similar. Dicha diferencia apunta a una mayor tasa de erosión durante el Cuaternario.

Sin embargo, dada la dificultad que entraña calcular con precisión el volumen de sedimentos antiguos, algunos investigadores han puesto en duda que los procesos superficiales acelerasen la erosión cuando el clima comenzó a enfriarse y fluctuar. En su estudio, Herman y sus colaboradores abordaron la cuestión a partir de información de otro tipo: la historia térmica de las rocas.

Gracias a una técnica conocida como termocronología, la historia térmica de una muestra puede reconstruirse a partir de la concentración relativa de determinados gases nobles o la distribución de los daños causados en su estructura por las desintegraciones radiactivas. En concreto, la termocronología permite datar el momento en que una roca se enfrió y alcanzó la denominada temperatura «de

cierre»; es decir, aquella por debajo de la cual los isótopos gaseosos dejan de difundirse hacia el exterior del mineral, o bien cuando los daños detienen el recocido (*annealing*). Dado que la temperatura aumenta con la profundidad, dicha datación permite estimar la velocidad a la que la erosión acercó la roca a la superficie. Las temperaturas de cierre oscilan, según el termocronómetro, entre 70 y 250 grados Celsius.

Combinando termocronómetros con diferentes temperaturas de cierre, los autores implementaron un ingenioso método para determinar las variaciones pasadas de la tasa de erosión. Recopilaron casi 18.000 datos termocronológicos distribuidos por todo el planeta y aplicaron un algoritmo para reconstruir la evolución de la tasa de erosión durante distintos intervalos de tiempo. Sus resultados pusieron de manifiesto que la erosión de las cadenas montañosas se fue acelerando en todo el planeta a medida que el clima se enfriaba, un hallazgo que confirma la información procedente de los volúmenes de sedimentos.

Desgaste glaciar

A lo largo de los últimos dos millones de años, el aumento progresivo de la tasa de erosión ha sido más acentuado en las latitudes medias (entre 30º y 50º). Por ello, los investigadores sostienen que la dinámica glaciar constituye el principal causante de la aceleración de la erosión, ya que, en dichas latitudes, gran parte del terreno más elevado quedó cubierto por glaciares por primera vez.

Los autores apoyan su conclusión en el hecho —conocido— de que los glaciares dejan su distintiva impronta geomorfológica en períodos de tiempo bastante cortos. Así, las modificaciones del paisaje que modelaron el espectacular sistema de fiordos en Noruega, Groenlandia, el margen occidental de Norteamérica, Chile y Nueva Zelanda deben haberse producido en escasos millones de años. Los glaciares constituyen eficientes agentes erosivos, ya que pueden desgastar y levantar el lecho rocoso al deslizarse por pendientes abruptas.

La hipótesis de que el cambio climático constituyó el principal motor del reciente incremento de la erosión montañosa ha suscitado un acalorado debate. Por regla general, los aumentos bruscos de erosión se han atribuido más a las variaciones de la actividad tectónica que al clima. Numerosos geólogos han interpretado el reciente aumento de la erosión como producto de un levantamiento tectónico, aun en lugares donde no existen indicios directos de movimientos de placas tectónicas.

Por desgracia, los análisis de Herman y sus colaboradores no pueden esclarecer lo acontecido en esas regiones controvertidas. Ello se debe a que, en dichas zonas, las tasas de erosión eran bajas antes de que comenzaran a aumentar hace menos de diez millones de años. Sin embargo, el método termocronológico empleado por los autores requiere una erosión total elevada, ya que deben poder exhumar las rocas desde las profundidades asociadas a las temperaturas de cierre, lo que implica una erosión a escala kilométrica. Un desgaste tan pronunciado solo suele alcanzarse en áreas donde se ha mantenido un levantamiento tectónico durante largos períodos de tiempo; por ello, la investigación se circunscribió a aquellas áreas en las que hoy en día existe una actividad tectónica sustancial, o bien a otras donde la hubo durante el período del enfriamiento.

Pese a dicha limitación, el nuevo estudio ha aportado pruebas convincentes de que los recientes fenómenos de erosión se produjeron a escala global. Los resultados indican que la erosión responde al clima, ya que, a diferencia de la actividad tectónica, este puede variar de manera sincrónica en todo el planeta.

—David Lundbek Egholm
Departamento de ciencias de la Tierra
Universidad de Aarhus

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 504, págs. 380-381, 2013. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2013

PARA SABER MÁS

Late Cenozoic uplift of mountain ranges and global climate change: Chicken or egg? Peter Molnar y Philip England en *Nature*, vol. 346, págs. 29-34, julio de 1990.
Late Cenozoic increase in accumulation rates of terrestrial sediment: How might climate change have affected erosion rates? Peter Molnar en *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, vol. 32, págs. 67-89, mayo de 2004.
Worldwide acceleration of mountain erosion under a cooling climate. Frédéric Herman et al. en *Nature*, vol. 504, págs. 423-426, diciembre de 2013.

GENÉTICA

Desequilibrio genómico en el síndrome de Down

Un estudio reciente arroja luz sobre los mecanismos genéticos que originan los síntomas de este trastorno

DAVID GONZÁLEZ KNOWLES

El síndrome de Down, o trisomía 21, constituye la alteración cromosómica viable más frecuente en los humanos. El trastorno aparece en aproximadamente uno de cada 750 nacimientos y es la causa genética más frecuente de retraso mental. Aunque tal síntoma es por el que más se conoce la enfermedad, no se trata del único; a menudo viene acompañado de otras alteraciones, como defectos cardíacos, hipotonía muscular, problemas auditivos y visuales o envejecimiento prematuro, cuya gravedad puede variar de un paciente a otro.

En la actualidad, como sucede en muchos otros trastornos de origen genético, no existe cura para el síndrome de Down. Si queremos desarrollar un tratamiento contra él, así como para otras enfermedades genéticas similares, en primer lugar debemos conocer los mecanismos

que originan los síntomas. Identificar los genes que presentan un nivel de expresión alterado (esto es, que producen una cantidad anómala de proteínas) en las personas afectadas nos puede ofrecer pistas sobre las rutas y procesos celulares involucrados en el trastorno. Averiguar estos detalles supondría un paso adelante en el conocimiento de la enfermedad y permitiría albergar esperanzas sobre futuros tratamientos que paliaran al menos algunos de los síntomas.

Teniendo en cuenta esta idea, nuestro grupo del Centro de Regulación Genómica de Barcelona, junto con investigadores de la facultad de medicina de la Universidad de Ginebra y de otros centros, emprendimos un estudio para examinar la expresión de todos los genes del genoma e identificar cómo variaba esta entre individuos sanos y afectados.

Obstáculos metodológicos

En el síndrome de Down, una de las complicaciones a la hora de determinar los mecanismos responsables de las alteraciones es que no existe un gen específico dañado. El mal radica en que hay una copia extra del cromosoma 21, por lo que debemos averiguar el efecto de poseer una copia de más en el funcionamiento celular. Puesto que los genes del cromosoma adicional no sufren en principio anomalías, las causas deberán buscarse en las diferencias de la expresión génica entre individuos sanos y trisómicos.

En teoría, podrían identificarse los genes implicados en el trastorno mediante la comparación de los niveles de expresión de los genes en un individuo sano con los de un individuo con el síndrome. Esta tarea podría parecer sencilla, pues existen desde hace años métodos para determinar el nivel de expresión de un gen. Sin embargo, no se ha abordado antes debido a dos problemas.

El primero es el coste y complejidad de secuenciar todos los genes que se hallan expresados en una muestra. Los métodos corrientes no eran adecuados, hasta hace poco, para el análisis de más de un puñado de genes a la vez; realizar el proceso para todos los genes en todas las muestras resultaba inviable.

La otra dificultad reside en diferenciar los rasgos atribuibles al cromosoma extra de los que se deben a las variaciones entre individuos. De modo ingenuo, podríamos pensar que si hay tres copias del cromosoma 21 en lugar de dos, la expresión de los genes implicados en el trastorno se verá incrementada en la misma proporción (la cantidad de proteínas sintetizadas por los genes en cuestión aumentaría en un tercio), lo que haría fácil su identificación. Pero los estudios anteriores que han comparado la expresión de algunos genes entre individuos sanos y con síndrome de Down indican que la realidad es más compleja.

Los genes cuentan con mecanismos precisos de regulación para mantener sus niveles de expresión estables ante múltiples alteraciones. El efecto de añadir copias resulta a menudo sutil y depende en gran medida del gen en cuestión. Por consiguiente, al quedar amortiguados los cambios de expresión génica, con frecuencia no pueden distinguirse las variaciones normales de las anómalas.

Avances técnicos y azar

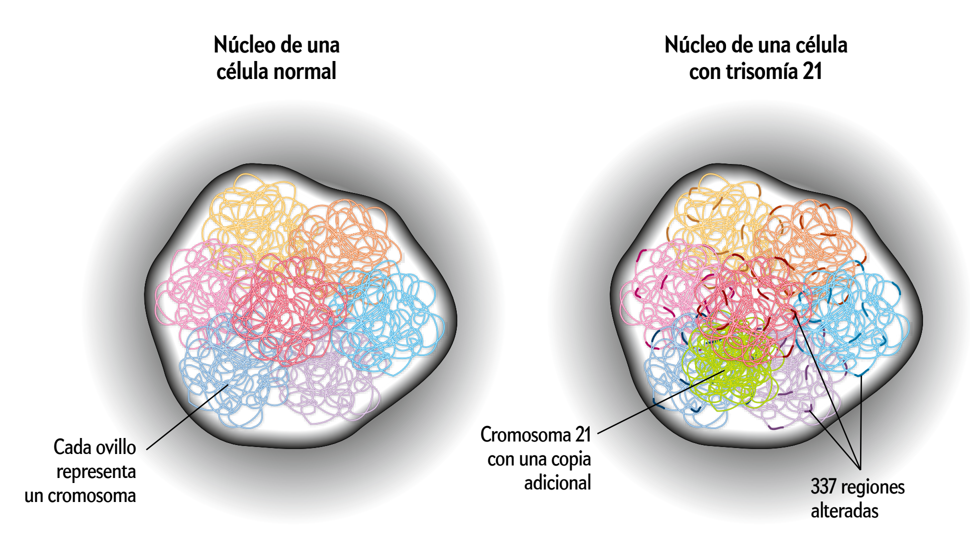
Los dos obstáculos descritos se han podido solventar en tiempo reciente. El primero, gracias a los avances en el campo de la secuenciación; el segundo, como consecuencia de un hecho azaroso.

Los progresos en las técnicas de ultrasecuenciación de los últimos diez años, derivados de los conocimientos adquiridos durante el Proyecto Genoma Humano, han reducido enormemente el coste y el tiempo necesarios para conocer la secuencia del genoma completo de un individuo. Esta se puede obtener hoy en unos días por unos pocos miles de euros. Además, existe la posibilidad de analizar el transcriptoma (transcritos de ARN), que corresponde al conjunto de genes que se encuentran activos en un momento determinado. Al representar una pequeña fracción del genoma, este resulta aún más barato de secuenciar.

La suerte desempeñó un papel decisivo para superar el segundo impedimento, esto es, distinguir los cambios causados por las diferencias entre individuos de los debidos al cromosoma adicional. Se identificaron un par de gemelos monocigóticos (idénticos) en los que se había producido un fallo en la división celular después de la separación de los mismos. Como consecuencia, uno de ellos presentaba tres copias del cromosoma 21, mientras que el otro era sano. Los investigadores supieron ver el potencial de este suceso extraordinario. A excepción del cromosoma 21 adicional, las células de ambos hermanos poseían un genoma idéntico. Ello eliminaba el ruido que introducía la variación genética entre individuos y permitía centrarse en las diferencias ocasionadas por el cromosoma de más.

Repercusiones en todo el genoma

A partir de las células obtenidas de estos gemelos se analizó la expresión del genoma completo para identificar las diferencias de expresión entre las células trisómicas y las normales.



EN EL SÍNDROME DE DOWN, algunos síntomas se deben al efecto directo del cromosoma 21 adicional, cuyos genes presentan una expresión anómala (producen más transcritos de ARN y proteínas de lo normal). Pero, además, se han identificado 337 zonas cromosómicas a lo largo de todo el genoma donde los genes también se ven alterados por la influencia del cromosoma 21 adicional. Ello causa deficiencias en otros rasgos no controlados directamente por este cromosoma.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Los resultados, publicados el pasado marzo en *Nature*, revelaron que tales diferencias no solo se debían a la expresión de genes presentes en el cromosoma adicional, sino que también aparecían cambios en determinadas regiones distribuidas a lo largo de todo el genoma. En concreto, el estudio identificó 337 regiones alteradas en las células con trisomía que no lo estaban en las células normales.

Hasta la fecha, la mayoría de las investigaciones sobre la expresión génica en esta patología se han centrado en genes del cromosoma 21. Algunos de ellos se han vinculado claramente con los impedimentos cognitivos de los enfermos. Sin embargo, no se han podido identificar los genes responsables de todas las anomalías. Ya se sospechaba que algunos de los síntomas estaban relacionados con genes de otros lugares y cuya expresión estaría alterada debido a cambios generales en el equilibrio celular. Pero estos genes podrían estar situados en cualquier parte del genoma, lo que hacía difícil su identificación.

Aunque se desconoce el motivo por el que estas zonas presentan una expresión anómala, se ha visto que están asociadas en gran medida a regiones de ADN compactado situadas en la periferia del núcleo, las cuales suelen presentar genes con una expresión reprimida. No obstante, parece que en la trisomía del cromosoma 21 esta represión resulta menor. Basándose en esta observación, se han planteado dos hipótesis no excluyentes para explicar los síntomas del síndrome.

Por un lado, la sobreexpresión de genes del cromosoma 21 implicados en el mantenimiento de la estructura de la cromatina (forma condensada que adoptan los cromosomas en el núcleo en condiciones normales, cuando la célula no se divide) provocaría alteraciones en la arquitectura de esta, lo que a su vez modificaría la expresión génica en las regiones afectadas. Por otro lado, la presencia de un cromosoma adicional añade un porcentaje nada despreciable de ADN al núcleo, lo que perturbaría el equilibrio celular.

Este estudio corrobora las sospechas que se tenían de que en el síndrome de Down intervienen genes que se hallan repartidos por todo el genoma, los cuales se ubican en 337 regiones distintas. El hallazgo reduce extraordinariamente la proporción del genoma que debe examinarse para identificar los genes en cuestión, lo que permitirá avanzar en el entendimiento de los cambios genéticos que dan lugar a los síntomas de esta enfermedad.

—David González Knowles
Integromics S.L.
Parque Científico de Madrid

PARA SABER MÁS

Domains of genome-wide gene expression dysregulation in Down's syndrome. A. Letourneau et al. en *Nature*, n.º 508, págs. 345-350, abril de 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

La vida interior del genoma. T. Misteli en *IyC*, abril de 2011.
Evolución de la cromatina. G. A. Babbitt en *IyC*, mayo de 2011.

COMUNICACIÓN

Avances y retos en la comprensión de datos biológicos

Crónica del V congreso internacional sobre visualización

MICHAEL P. SCHROEDER Y NÚRIA LÓPEZ BIGAS

La conferencia internacional sobre visualización de datos biológicos (www.vizbi.org) reúne cada año a científicos de todos los ámbitos para debatir sobre las formas de representar la multitud de datos biológicos que se están generando en la actualidad. Durante cuatro días se presentan numerosas herramientas y enfoques centrados en la representación visual orientada a facilitar la interpretación de datos complejos.

Una de las particularidades más interesantes de ese encuentro es que a él asisten, además de biólogos, especialistas en informática y visualización de datos. Así, el inicio de la última y quinta edición de la conferencia (celebrada en Heidelberg a principios del pasado mes de marzo), fue protagonizado por el informático experto en interpretación de grandes conjuntos de datos Jeffrey Heer, de la Universidad de Washington, quien introdujo a los participantes en los principios de la visualización de datos.

Heer citó dos factores que definen una buena visualización: la expresividad y la eficiencia. La opción más expresiva será la que incluya todos los datos que pretendemos representar, y solo esos. La más eficiente será la más rápida de interpretar. Para ilustrar estos aspectos se presentó un estudio que comparaba la interpretación de los mismos datos representados mediante diferentes formas: gráficos circulares y diagramas de barras. Se destacó en este trabajo el cambio de magnitud percibido por las personas entrevistadas respecto a las diferentes versiones. Conclusión: los gráficos circulares resultan engañosos y las barras son más adecuadas. De ahí que Manolis Savva, de la Universidad Stanford, y otros colaboradores desarrollaran en 2011 ReVision, un programa informático que permite «revisualizar» gráficos circulares en forma de diagramas de barras.

Coordenadas, matrices y redes

Pero los datos biológicos poseen ciertas características que entrañan dificultades adicionales a su visualización. Nos referimos a la densidad y la multidimensionalidad.

En los estudios sobre genómica del cáncer, para determinar el perfil molecular de un tumor con frecuencia se realizan múltiples ensayos (secuenciación del genoma, secuenciación del transcriptoma y nivel de metilación del ADN). En los proyectos actuales del Consorcio Internacional del Genoma del Cáncer —en el que España participa—, se aplican los ensayos mencionados a miles de muestras de pacientes. La meta es analizar, como mínimo, el tumor de unas 500 personas para los 50 tipos de cáncer más

frecuentes. Además de solventar los retos puramente computacionales del análisis de esta gran cantidad de datos, se necesitan estrategias para su exploración y visualización. ¿Cómo pueden representarse tantos datos multidimensionales de varios centenares de pacientes y casi 20.000 genes?

En enero de 2013 publicamos un artículo de revisión en *Genome Medicine* en el que mostrábamos que las herramientas de representación disponibles pueden clasificarse en tres categorías: ligadas a la posición genómica, de matrices de colores y de redes. Aparte de la visualización, la interacción con el usuario constituye un componente clave; es decir, la visualización debe ser adaptable a las necesidades e intereses de cada investigador. Por ello revisten importancia aspectos como la navegación por la representación visual, la opción zum, la visualización a diferentes niveles de resolución y la posibilidad de filtrar y ordenar los datos.

En las visualizaciones ligadas a la posición genómica se representa cada medición en horizontal, alineada con el genoma de referencia. Al reducir cada medición a uno o pocos píxeles pueden visualizarse a la vez muchos datos, procedentes de diferentes tipos de ensayos. A ojo pueden observarse regiones genómicas que tienden a presentar valores extremos. En el caso de que sea necesario ver los datos con mayor precisión, puede ampliarse el detalle de la medición y reducir la extensión de la región genómica.

La representación de matrices de colores (*heatmaps*) viene utilizándose desde hace varias décadas en biología, sobre todo para representar los resultados de micromatrices de expresión. A menudo, su imagen estática resulta insuficiente para extraer información. Para solventarlo, en nuestro laboratorio hemos desarrollado Gitools (www.gitools.org), un visualizador interactivo de matrices multidimensionales de colores. Estos mapas ofrecen una vía de exploración muy interesante, ya que permiten decidir libremente el orden de las columnas y las filas, por lo que no estan ligados a la posición genómica; ello facilita el estudio de asociaciones entre entidades alojadas en regiones distantes del genoma, como sería el caso de un grupo de genes que pertenecen a la misma ruta molecular. Asimismo, permiten superponer visualmente las distintas mediciones, lo que facilita el análisis de las asociaciones.

Imaginemos, por ejemplo, que tenemos un mapa de colores en forma de matriz, cuyas columnas representan pacientes y cuyas filas corresponden a genes, y en la que cada celda tiene asociado el valor de expresión y el número de copias del gen en el genoma. El hecho de tener varios valores asociados a las celdas se puede aprovechar para estratificar los datos según un criterio y observar el comportamiento del otro. Con Gitools podemos ordenar las columnas (pacientes) según el número de copias del gen y observar rápidamente el efecto que ejerce un cambio de copias en la expresión del gen en las muestras respectivas. Con un mapa de colores se pueden representar una gran cantidad de muestras a la vez.

En el caso de las redes, si bien no ofrecen tanta resolución como los dos formatos de visualización ya presentados, aportan una información crucial: las interacciones entre los diferentes componentes o proteínas. Un nodo puede representar un gen o una proteína, y la información de la cohorte de pacientes se puede alinear circularmente en capas, asignando una capa a cada ensayo. Así, pueden representarse relaciones de interacción como la siguiente: un gen (o nodo) que resulta crítico en la regulación de la expresión de otros genes y se encuentra frecuentemente mutado puede enlazarse con los genes que regula y dibujar el estado de expresión. En casos de rutas moleculares, la visualización reticular resulta muy informativa.

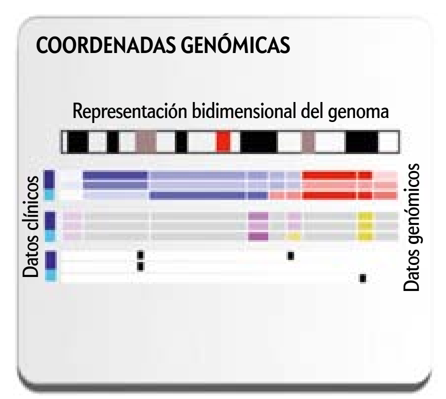
Cada esquema presenta ventajas y desventajas, por lo que se recomienda utilizar múltiples herramientas para investigar los mismos datos.

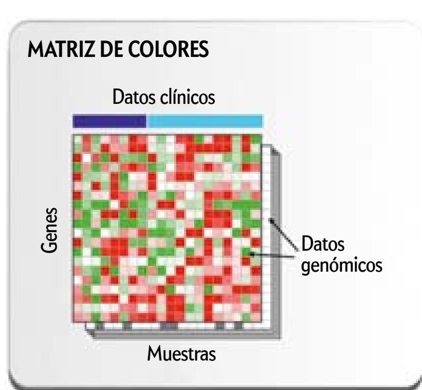
Genómica y proteómica en 3D

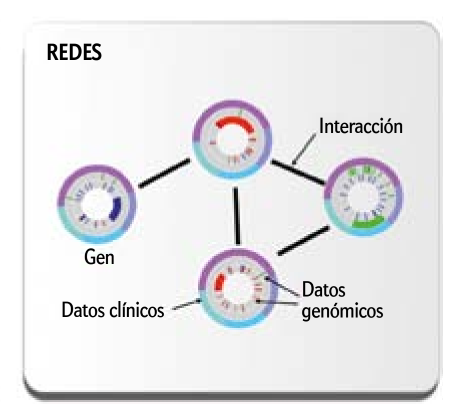
Aparte de discutir sobre la representación de datos genómicos, en la conferencia de este año hubo sesiones enfocadas a la visualización de datos del transcriptoma, estructuras tridimensionales de proteínas, sistemas celulares, tejidos y organismos, y también metagenómica y poblaciones.

Eduardo Eyras, de la Universidad Pompeu Fabra, y Joseph Barash, de la Universidad de Pensilvania, debatieron sobre los retos de la visualización del proceso de corte y empalme del ARN. Eyras mostró que este se halla frecuentemente alterado en el cáncer, ya que, en las células tumorales, las variantes génicas se presentan en proporciones distintas de las del tejido normal.

Marc A. Martí-Renom, del Centro Nacional de Análisis Genómico y el Centro de Regulación Genómica, se centró en las soluciones para la visualización y exploración de los modelos tridimensionales de la cromatina humana. Estos ayudan a entender qué partes del genoma están cercanas







TRES FORMAS DE REPRESENTAR DATOS GENÓMICOS de un conjunto de unas 500 muestras (o pacientes). Las tres soluciones tienen en común que representan información de múltiples genes, para muchas muestras de pacientes, y que esta información se asocia a un contexto de datos clínicos para facilitar la interpretación. La visualización permite al investigador navegar por los abundantes datos. Según el tipo de indagación, resultará más útil un formato u otro.

CORTESÍA DE LOS AUTORES



LA INTERACCIÓN DEL USUARIO con la información constituye un componente clave de la visualización de datos biológicos complejos. El programa Kartes (desarrollado por el Grupo de Genómica Estructural del Centro Nacional de Análisis Genómico y el Centro de Regulación Genómica) permite al investigador visualizar de forma simultánea las versiones 2D (*secuencias lineales en la pantalla pequeña*) y 3D (*estructura verde en la pantalla grande*) de una región determinada del genoma.

GRUPO DE GENÓMICA ESTRUCTURAL CNAG-CRG

en el espacio y, por tanto, podrían interaccionar. El genoma suele representarse de forma lineal (en dos dimensiones). Sin embargo, en el núcleo de las células este adopta una conformación tridimensional que se ha revelado de gran importancia para la regulación de la replicación y la transcripción del ADN. En particular, es importante poder visualizar las regiones del genoma que, si bien alejadas en la representación bidimensional, se hallan en realidad muy próximas. ¿Cómo puede representarse esta información de manera intuitiva? Martí-Renom presentó Kartes (3dgenomes.org), un programa informático que permite cartografiar la tercera dimension en regiones seleccionadas. Así, el investigador puede orientarse a la vez en el modelo tridimensional y en el bidimensional.

Por otro lado, Roberto Mosca expuso el trabajo que están llevando a cabo en el grupo que Patrick Aloy dirige en el Instituto de Investigación Biomédica. En concreto, presentó Interactome3D (interactome3d.irbbarcelona.org), un servicio web creado para visualizar interacciones entre proteínas, basado en una red que cuenta con la estructura tridimensional de cada proteína (o nodo). Con esta herramienta esperan llenar los huecos existentes entre diferentes resoluciones del interactoma de proteínas. Cuando se visualiza a baja resolución se muestra la red de interacciones de proteínas; en alta resolución, se visualiza la estructura de la proteína, incluidos los detalles de la interacción entre dos proteínas.

En resumen, VizBi constituye una conferencia interdisciplinaria e inspiradora: una solución de visualización puede servir a varios campos científicos de diferentes maneras.

—Michael P. Schroeder
—Núria López Bigas
ICREA y Universidad Pompeu Fabra

PARA SABER MÁS

ReVision: Automated classification, analysis and redesign of chart images. Manolis Savva et al. en *Proceedings of the 24th annual ACM symposium on user interface software and technology*, págs. 393-402, 2011.

Gitools: Analysis and visualisation of genomic data using interactive heat-maps. Christian Pérez-Llamas y Núria López-Bigas en *PLoS One*, vol. 6, n.º 5, mayo de 2011.

Visualizing multidimensional cancer genomics data. Michael P. Schroeder, Abel González-Pérez y Núria López-Bigas en *Genome Medicine*, vol. 5, n.º 1, enero de 2013.



DEMOGRAFÍA

Inmigración y riqueza

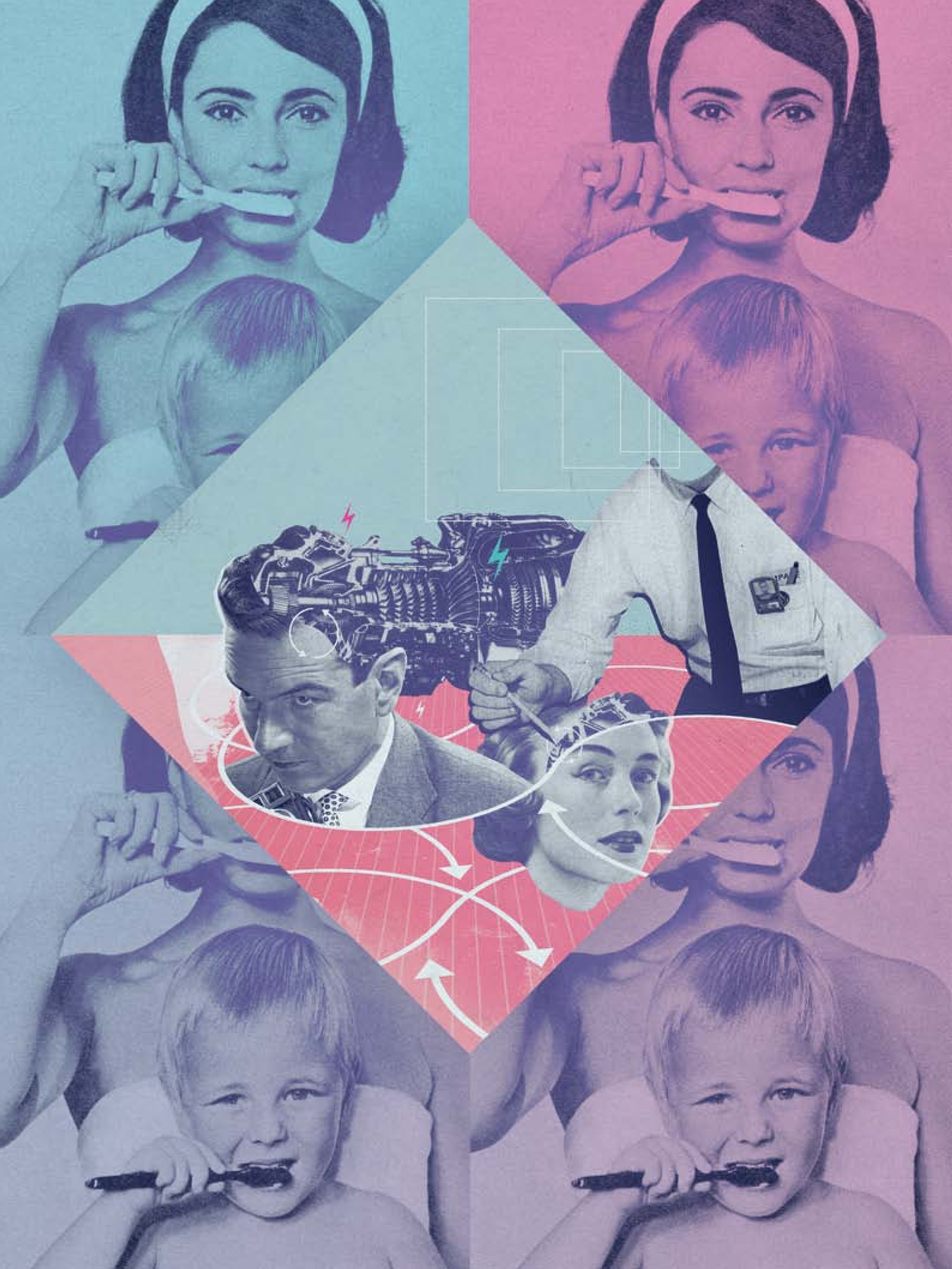
Los inmigrantes ascienden poco a poco por la escala de la prosperidad

MARK FISCHETTI

La creencia popular vincula la inmigración con la pobreza, «el mísero vulgo que se agolpa en tus orillas» según escribió la poetisa Emma Lazarus en 1883 como homenaje a la estatua de la Libertad. Los datos, sin embargo, desmienten ese prejuicio. La gráfica de los 50 mayores flujos migratorios demuestra que el número de personas paupérrimas que abandonan su hogar es muy escaso y que cuando lo hacen suelen emigrar a países de renta media. ¿Por qué? La investigación indica que carecen de los recursos o la formación necesarios para prosperar en los países más ricos. «Es como ascender por una escalera: has de pasar por todos los peldaños para llegar arriba», afirma Nikola Sander, quien, con uno de sus colaboradores del Instituto de Demografía de Viena, halló las tendencias a partir de los datos de las Naciones Unidas. Los mayores movimientos migratorios se dirigen desde los países de renta media (*segmentos 2000-20.000 del círculo*) a los de renta alta, salvo contadas excepciones (*indicadas en la gráfica*).

—Mark Fischetti

FUENTES: «QUANTIFYING GLOBAL INTERNATIONAL MIGRATION FLOWS», POR GUY J. ABEL Y NIKOLA SANDER EN *SCIENCE*, VOL. 343; 28 DE MARZO DE 2014; «THE GLOBAL FLOW OF PEOPLE», POR NIKOLA SANDER, GUY J. ABEL Y RAMON BAUER WWW.GLOBAL-MIGRATION.INFO



COMPORTAMIENTO

PSICOBIOLOGÍA DE LOS HÁBITOS

Al descifrar los mecanismos neurales que subyacen a nuestros rituales diarios, los investigadores comienzan a comprender el modo en que adquirimos los hábitos y por qué nos cuesta tanto desterrarlos

Ann M. Graybiel y Kyle S. Smith

EN SÍNTESIS

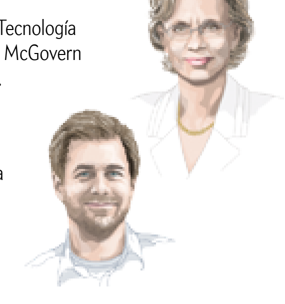
Al repetir una conducta, esta se acaba fijando en circuitos específicos de hábitos que involucran al estriado del cerebro. Tales circuitos tratan la rutina como una unidad de actividad automática.

Sin embargo, la neocorteza se encarga de supervisar el hábito. Si mediante señales de luz se modifica esta parte del cerebro en ratas de laboratorio, se puede interrumpir un hábito o interferir en su formación.

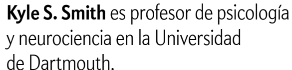
Conocer mejor el funcionamiento de estas estructuras cerebrales podría contribuir al desarrollo de nuevos fármacos, terapias de conducta o simples trucos que nos ayuden a controlar nuestros hábitos.

MAREK HAIDUK

Ann M. Graybiel es profesora del Instituto de Tecnología de Massachusetts e investigadora del Instituto McGovern para el Estudio del Cerebro de esa universidad.



Kyle S. Smith es profesor de psicología y neurociencia en la Universidad de Dartmouth.



Cada día todos llevamos a cabo un sorprendente número de rutinas. Muchas de ellas, como cepillarnos los dientes o conducir por una ruta habitual, nos permiten realizar ciertas tareas de forma automática. Evitamos así la sobrecarga del cerebro que se produciría si nos concentráramos en cada pasada del cepillo o en los incontables pequeños movimientos del volante para ajustar el rumbo. Otras costumbres, como salir a correr, contribuyen a mantenernos sanos. En cambio, comer con regularidad golosinas seguramente no nos ayudará. Y los hábitos que entran en el territorio de la compulsión o la adicción, como la sobreingesta o fumar, pueden poner en riesgo nuestra existencia.

A pesar de que los hábitos constituyen una parte importante de nuestra vida, averiguar cómo el cerebro convierte una nueva conducta en rutina ha entrañado una enorme dificultad. Sin este conocimiento, los especialistas lo han tenido complicado a la hora de ayudar a las personas a abandonar sus malos hábitos, ya sea mediante tratamiento farmacológico o de otro tipo.

Las nuevas técnicas están permitiendo descifrar por fin los mecanismos neurales que se hallan en la base de nuestros rituales. Se han identificado así los llamados circuitos de hábitos, esto es, las regiones cerebrales y las conexiones responsables de crear y mantener las rutinas. El conocimiento aportado por esta línea de investigación está ayudando a comprender cómo construye el cerebro buenos hábitos y por qué nos cuesta abandonar no solo los de menor importancia, sino también los que el médico o las personas queridas nos piden que interrumpamos. Los estudios sugieren que si condicionamos de forma deliberada nuestro cerebro, podríamos llegar a controlar los hábitos, tanto los positivos como los negativos. Podemos albergar esta esperanza gracias a un hallazgo sorprendente: incluso cuando parece que actuamos de forma automática, una parte del cerebro está supervisando nuestra conducta.

¿QUÉ ES UN HÁBITO?

Los hábitos parecen un tipo peculiar de acción, pero desde un punto de vista neurológico pertenecen al amplio espectro de la conducta humana.

En una parte del espectro hallamos comportamientos que pueden realizarse con el suficiente automatismo como para dejarnos espacio cerebral para otros propósitos. Otros, en cambio, exigen dedicarles tiempo y energía. Los hábitos se forman de modo espontáneo a medida que exploramos el medio físico y social y nuestro mundo interno. Ponemos a prueba las conductas en situaciones concretas, descubrimos cuáles parecen beneficiosas y no muy costosas, las seleccionamos y pasamos a integrarlas en nuestra rutina.

Este proceso, que comienza en la infancia, viene con una contrapartida. Cuanto más rutinaria se vuelve una conducta, menos conscientes de ella nos volvemos. ¿Apagué la estufa antes de salir de casa? ¿Cerré la puerta? Esta falta de supervisión no solo puede interferir con nuestro funcionamiento diario, también puede favorecer la aparición de malos hábitos. Muchas personas que han engordado uno o dos kilos en poco tiempo se dan cuenta de repente de que han estado comiendo más chucherías de lo habitual sin ser conscientes de ello.

Esta pérdida gradual en la vigilancia de nuestras acciones también implica que los hábitos pueden compartir rasgos comunes con las adicciones. Piénsese en los juegos de ordenador, las apuestas en la Red o los mensajes electrónicos o tuits constantes, además, por supuesto, del consumo excesivo de alcohol u otras drogas. Un patrón de conducta repetitivo, de impulso adictivo, puede surgir de una antigua acción deliberada. Los neurocientíficos están aún lidiando con la idea de si las adicciones son como hábitos normales, solo que más acentuados, aunque sin duda pueden considerarse ejemplos extremos del espectro de la conducta. Así sucede en ciertas alteraciones neuropsiquiátricas, como el trastorno obsesivo compulsivo, en el que los pensamientos y las acciones se vuelven acaparadores, o ciertas formas de depresión, en las que los pensamientos negativos funcionan en un bucle continuo. Algunas formas extremas de los hábitos también pueden aparecer en el autismo o la esquizofrenia, enfermedades en las que uno de los problemas son las conductas repetitivas, excesivamente focalizadas.

DE LA CONDUCTA DELIBERADA A LA RUTINA

Aunque los hábitos se sitúan en diferentes partes del espectro de la conducta, comparten ciertos rasgos principales. Una vez se forman tienden a perdurar. Si uno se dice «deja de hacer eso», la mayoría de las veces no lo logrará, en parte debido a que la crítica suele aparecer demasiado tarde, cuando ya se ha producido la conducta y sus consecuencias se han manifestado.

Tal persistencia ha contribuido a desentrañar el circuito neural responsable de la formación y el mantenimiento de los hábitos. Estos se vuelven tan arraigados que los llevamos a cabo incluso cuando no queremos, fenómeno al que contribuye lo que se denomina recompensa contingente. De este modo, cuando hacemos A, recibimos alguna recompensa; pero si hacemos B, no la recibimos o somos castigados. Las consecuencias asociadas a nuestras acciones determinan nuestra conducta futura en una u otra dirección.

Las señales descubiertas en el cerebro parecen corresponderse con ese aprendizaje dependiente del refuerzo, como mostraron en un principio Wolfram Schultz y Ranulfo Romo, ambos por entonces en la Universidad de Friburgo, en Suiza. Tales observaciones han sido corroboradas hoy mediante modelos

informáticos. De especial importancia son las señales de error en la predicción del refuerzo, que indican a posteriori la evaluación de la mente sobre si se cumplió una predicción acerca de una recompensa futura. De alguna manera, el cerebro analiza estas evaluaciones, lo que da forma a nuestras expectativas y añade o sustrae valor a ciertos modos de actuar. Mediante la supervisión interna de nuestras acciones y la asignación de un valor positivo o negativo, el cerebro refuerza determinadas conductas y convierte así las acciones deliberadas en habituales.

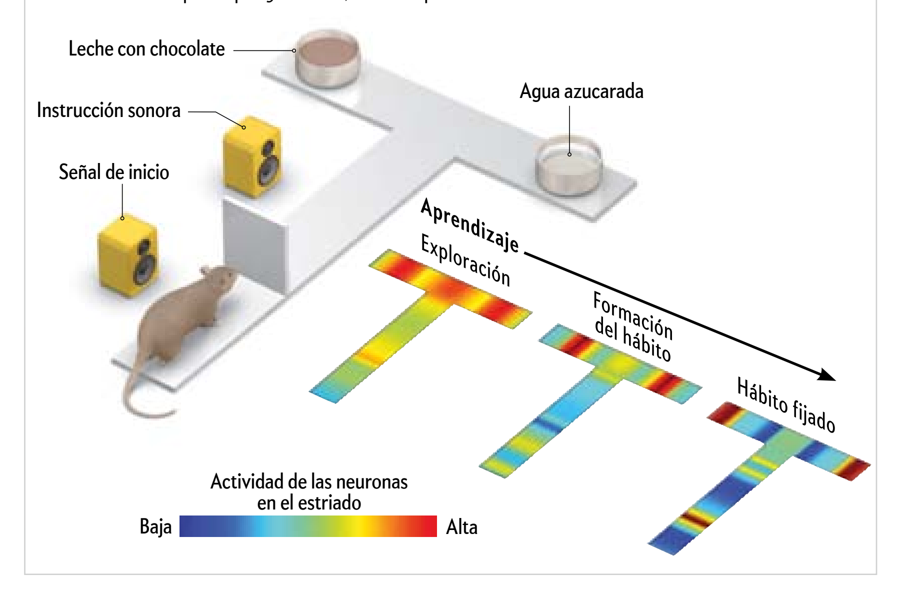
Muchos nos preguntábamos qué sucedía en los circuitos neurales para que se produjera este cambio y si podríamos suprimirlo. En el laboratorio de Graybiel, en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), comenzamos una serie de experimentos para descifrar qué vías cerebrales estaban involucradas y cómo variaba su actividad según se iban formando los hábitos.

Primero, necesitábamos un test para determinar si cierta conducta corresponde a un hábito. El psicólogo británico Anthony Dickinson desarrolló uno en los años ochenta del siglo xx que todavía se utiliza ampliamente. Él y sus colaboradores enseñaron a ratas de laboratorio a presionar una palanca en una caja experimental para recibir una recompensa en forma de comida.

EL EXPERIMENTO

Actuar sin pensar

Varios experimentos con ratas han revelado que el cerebro trata los hábitos como unidades simples de conducta. Los animales aprenden a recorrer un laberinto en T y, en función de la instrucción sonora recibida, giran a la izquierda o la derecha para conseguir una recompensa. En los primeros intentos (*primera T en color*) la actividad en el estriado cerebral es alta (*amarilla y roja*) durante la mayor parte del tiempo. Al formarse el hábito (*segunda T*) la actividad mengua (*verde y azul*), excepto cuando la rata se dispone a girar o beber. Una vez se ha fijado el hábito (*tercera T*) la actividad es alta solo al principio y al final, con lo que se delimita una unidad de conducta.



CORTESÍA DE ANN M. GRAYBIEL (*mapas de calor*); AXS BIOMEDICAL ANIMATION STUDIO (*ilustración*)

Cuando los animales habían aprendido la tarea y se hallaban de nuevo en sus jaulas, los experimentadores «devaluaron» la recompensa, bien dejando a las ratas que la comieran hasta la saciedad o administrándoles un fármaco que les producía una nausea moderada después de consumirla. Más tarde, llevaron de nuevo a los múridos a la caja y les dieron la opción de escoger entre presionar o no la palanca. Si lo hacían a pesar de que la recompensa les provocaba ahora malestar, Dickinson consideraba la conducta un hábito. Pero si el animal se mostraba consciente —si es que podemos atribuir esa capacidad a una rata— y no apretaba la palanca, como si se diera cuenta de que la recompensa se había vuelto desagradable, entonces se concluía que no se había formado un hábito.

FIJAR UN HÁBITO EN EL CEREBRO

Mediante variaciones de este test básico algunos investigadores, como Bernard Balleine, de la Universidad de Sídney, y Simon Killcross, de la Universidad de Nueva Gales del Sur en Australia, han demostrado que a medida que una acción deliberada se convierte en un hábito se modifican diferentes circuitos cerebrales. Experimentos con ratas, así como con monos o humanos, apuntan ahora a la existencia de múltiples circuitos que conectan entre sí la neocorteza (considerada la parte más avanzada de nuestro cerebro mamífero) y el estriado, en el centro de los ganglios basales (de origen más primitivo y situados en el núcleo de nuestro cerebro). Estos circuitos intervienen en mayor o menor grado según si actuamos de una forma premeditada o automática.

En nuestro laboratorio enseñamos a ratas y ratones a realizar una serie de tareas simples. En una de ellas aprendían a recorrer un laberinto en forma de T cuando oían un «clic». Dependiendo de una instrucción sonora que recibían cuando lo iban recorriendo, al final de la T debían girar a la derecha o la izquierda y llegar hasta el extremo del brazo para obtener un tipo u otro de recompensa. Nuestro objetivo era entender cómo el cerebro juzga los pros y contras de comportarse de una determinada manera y luego graba una secuencia de conductas como un hábito. Comprobamos así que nuestras ratas desarrollaban hábitos. Incluso cuando una recompensa se volvía aversiva, al oír la instrucción se acercaban a ella.

Para averiguar el modo en que el cerebro decide qué conducta se convertirá en hábito, el laboratorio del MIT comenzó a registrar la actividad eléctrica de pequeños grupos de neuronas del estriado. Los hallazgos resultaron sorprendentes. Mientras las ratas aprendían a recorrer el laberinto por primera vez, las neuronas de la zona del control motor del estriado se mantuvieron activas todo el tiempo. Pero a medida que su conducta se volvía rutinaria, la actividad neural comenzó a concentrarse al principio y al final de cada recorrido, y a disminuir durante la mayor parte del tiempo intermedio. Era como si la conducta en su conjunto hubiera sido «empaquetada» y las células del estriado se limitaran a identificar el inicio y el final de cada recorrido. Se trataba de un patrón inusual; parecía que las neuronas del estriado fueran maleables y ayudaran a empaquetar series de movimientos, al tiempo que unas pocas «células expertas» controlaban los detalles de la conducta.

Ese patrón nos hacía pensar en el modo en que el cerebro establece los recuerdos. Todos sabemos lo útil que resulta aprenderse secuencias de números en forma de unidades más grandes, en vez de cifras individuales, como cuando memorizamos un

Cómo se forman los hábitos

Para aprender y fijar un hábito seguimos tres pasos: exploramos una nueva conducta, la aprendemos y, por último, la grabamos en el cerebro (*números coloreados*). Aunque todavía no se han desentrañado todos los detalles, el estriado (*centro*) coordina cada uno de los pasos. Aunque parezca que realicemos nuestros hábitos «sin pensar», la corteza infralímbica (*abajo a la derecha*) sigue supervisando lo que hacemos.

1 Exploración de una nueva conducta: La corteza prefrontal se comunica con el estriado y este, a su vez, con el mesencéfalo, donde la dopamina facilita el aprendizaje y asigna valor a las acciones. Estos circuitos (*líneas continua y discontinua*) forman bucles de retroalimentación positiva, lo que nos ayuda a darnos cuenta de qué es lo que funciona y lo que no en la conducta.

2 Formación del hábito: Al repetir una conducta, se fortalece un bucle de retroalimentación entre la corteza sensitivomotora y el estriado, lo que nos ayuda a sellar nuestras rutinas en una unidad de actividad cerebral. Esta reside en parte en el estriado y depende de una señal dopaminérgica procedente del mesencéfalo.

3 Hábito fijado y permitido: Una vez que el hábito se ha almacenado como una unidad de conducta, la corteza infralímbica parece ayudar al estriado a fijarlo aún más en forma de actividad cerebral semipermanente. Mediante la dopamina, esta zona de la corteza parece controlar también cuándo permitir la activación de un hábito; inhibiendo esta región se pueden suprimir rutinas profundamente arraigadas.

teléfono como «555-1212» y no «5-5-5-1-2-1-2». El psicólogo George A. Miller introdujo el concepto de recodificación (*chunking*) para referirse a este agrupamiento de elementos en una unidad de memoria. La actividad neural que observábamos al inicio y final de un ensayo parecía similar. Según esta idea, el estriado establecería unas marcas delimitadoras en grupos de conducta (hábitos) que el proceso interno de evaluación ha decidido almacenar. De ser cierto, significaría que el estriado nos ayuda a combinar una secuencia de acciones en una única unidad. Miramos la bolsa de golosinas y, automáticamente, la alcanzamos, tomamos una de ellas y nos la comemos «sin pensar».

Asimismo, se ha identificado un circuito de deliberación en el que interviene otra parte del estriado. Se activa cuando la acción no se lleva a cabo de forma automática, sino que exige tomar una decisión.

Para comprender la interacción entre los circuitos de deliberación y de hábitos, Catherine Thorn, de nuestro equipo, registró la actividad en ambos circuitos de modo simultáneo. Cuando los animales aprendían una tarea, se estimulaba la parte deliberativa del estriado hacia la mitad del recorrido, especialmente cuando debían decidir hacia qué lado de la T dirigirse, según la instrucción sonora recibida. El patrón era casi opuesto a la recodificación observada en la región del estriado para los hábitos. Sin embargo, la actividad se desvanecía cuando la conducta se volvía habitual. Los datos indican que mientras aprendemos un hábito —al menos, cuando lo hacen las ratas— los circuitos relacionados con las rutinas se fortalecen, pero también se producen cambios en otros circuitos.

Dado que el estriado trabaja en coordinación con una parte de la neocorteza relacionada con los hábitos en la región frontal del cerebro conocida como corteza infralímbica, decidimos examinar la actividad en esta región. El resultado también fue esclarecedor. Aunque al comenzar el aprendizaje observamos una estimulación inicial y final en la zona para los hábitos del estriado, en la corteza infralímbica apenas notamos cambios. La actividad infralímbica solo se modificó después de que los animales se entrenaran durante un largo período y el hábito quedara fijado. En ese momento, también se formó en esa región un patrón de actividad de recodificación. Parecía como si esa parte de la corteza estuviera esperando a que el sistema de evaluación del estriado hubiera decidido si la conducta debía ser conservada antes de involucrar al resto del cerebro.

DETENER LA ACCIÓN

Mediante una nueva técnica denominada optogenética, decidimos comprobar si la corteza infralímbica controlaba de forma

AXS BIOMEDICAL ANIMATION STUDIO

directa la expresión de un hábito. El método consiste en introducir moléculas fotosensibles en una región minúscula del cerebro y, más tarde, hacer incidir un haz de luz sobre esta región para activar o desactivar sus neuronas. Realizamos el experimento con ratas que habían adquirido el hábito en el laberinto y habían formado el patrón de recodificación. Al desactivar su neocorteza durante solo unos segundos, mientras los animales corrían, conseguimos suprimir por completo el hábito.

El hábito podía eliminarse con rapidez, en ocasiones de inmediato, y el efecto se mantenía incluso después de retirar la luz. Sin embargo, las ratas no dejaron de correr por el laberinto. Tan solo dejaron de hacerlo hacia la recompensa devaluada. Pero seguían corriendo hacia la recompensa buena, en el otro lado. De hecho, al repetir el test, los múridos desarrollaron un nuevo hábito: se dirigían hacia el lado del laberinto en el que se encontraba la recompensa positiva, sin importar qué señal auditiva se les proporcionara.

Cuando más tarde inhibimos la misma parte de la corteza infralímbica, el nuevo hábito desapareció y el antiguo resurgió de forma instantánea. Este retorno de la antigua rutina ocurrió en cuestión de segundos y duró el resto del test, sin necesidad de volver a desactivar la corteza infralímbica.

Muchas personas que se han esforzado para desterrar un hábito lo han visto recuperar después, en todo su esplendor, tras un período de estrés o una recaída. Cuando Ivan Pavlov estudió este fenómeno en perros hace años, concluyó que los animales nunca olvidan conductas profundamente condicionadas como los hábitos. Lo máximo que pueden hacer es suprimirlas. En nuestras ratas hemos observado una persistencia similar. Pero, notoriamente, hemos podido activar y desactivar las rutinas manipulando una región diminuta de la neocorteza mientras se produce la conducta. Desconocemos el alcance de tal control. Si enseñamos a las ratas tres hábitos consecutivos y suprimimos el tercero de ellos, ¿reaparecerá el segundo? Y si luego inhibimos el segundo, ¿resurgirá el primero?

Una cuestión clave era si lograríamos impedir que se formase un hábito. Adiestramos a las ratas lo justo para que eligieran el lado correcto de la T, pero no lo suficiente como para que la conducta se convirtiera en un hábito. Luego continuamos el entrenamiento, pero durante cada ensayo utilizamos la optogenética para inhibir la corteza infralímbica. Continuaron corriendo bien por el laberinto, pero nunca llegaron a adquirir el hábito, a pesar de los numerosos días de entrenamiento. Un grupo de ratas de control que siguieron el mismo adiestramiento sin la interrupción optogenética adquirieron el hábito de forma normal.

DESTERRAR LAS MALAS COSTUMBRES

Nuestros experimentos nos han proporcionado varias lecciones interesantes. Primero, no es de extrañar que los hábitos resulten tan difíciles de eliminar; acaban integrados y fijados como grupos (*chunks*) estandarizados de actividad neural, un proceso en el que intervienen múltiples circuitos cerebrales.

No obstante, sorprende que, aunque los hábitos parezcan casi automáticos, están en realidad bajo el continuo control de al menos una parte de la neocorteza, una zona que debe permanecer activa para que la rutina se lleve a cabo. Los hábitos estarían ahí, preparados para manifestarse cuando la neocorteza determine que las circunstancias son las adecuadas. Aunque no seamos conscientes de estar supervisándolos, poseemos unos circuitos que realizan un seguimiento activo y constante de ellos. Puede que metamos la mano en la bolsa de golosinas «sin pensarlo», pero un sistema de vigilancia está trabajando en el cerebro, como el piloto automático en una aeronave.

¿Hasta qué punto podemos ayudar clínicamente a las personas con problemas? Quizá pasará mucho tiempo antes de que dispongamos de un interruptor que nos permita terminar con nuestros hábitos molestos. Los métodos experimentales que nuestro grupo y otros estamos utilizando no pueden ser trasladados aún a las personas. Pero la neurociencia está avanzando a la velocidad de la luz, y los que trabajamos en este terreno estamos acercándonos a un resultado importante: las reglas que rigen el funcionamiento de los hábitos. Si pudiéramos entender en profundidad cómo estos se adquieren y abandonan, comprenderíamos mejor nuestras conductas idiosincrásicas y cómo entrenarlas.

Tal vez nuestro conocimiento creciente pudiera ayudar incluso a las personas que se sitúan en la franja más extrema del espectro de los hábitos, lo que nos ofrecería pistas sobre cómo tratar el trastorno obsesivo compulsivo, el síndrome de Tourette, el miedo o el trastorno de estrés postraumático.

El tratamiento farmacológico y otras terapias emergentes quizá contribuyan a luchar contra los hábitos dañinos. Pero también nos ha sorprendido que esta investigación sobre el cerebro respalde las estrategias empleadas en la terapia de conducta, que suele indicarse para establecer hábitos saludables y librarnos de los perjudiciales. Si uno quiere condicionarse a sí mismo para correr por las mañanas, entonces tal vez deba sacar las zapatillas deportivas la noche anterior, de modo que no pueda pasarlas por alto cuando se levante por la mañana. Esta señal visual remeda la señal auditiva que nosotros utilizamos para entrenar a las ratas, y puede resultar especialmente efectiva si uno se recompensa a sí mismo después del ejercicio. Si lo practicamos un número suficiente de mañanas, nuestro cerebro puede desarrollar el patrón de recodificación que deseamos. Por otra parte, si queremos olvidarnos de la bolsa de chucherías, mejor eliminarla de la sala o la oficina, con lo que suprimiremos la señal.

Cambiar un hábito quizá nunca resulte fácil. Como dijo Mark Twain «Nadie se desembaraza de un hábito o de un vicio tirándolo de una vez por la ventana; hay que sacarlo por la escalera, peldaño a peldaño». Nuestros experimentos, sin embargo, nos permiten albergar optimismo. Al conocer mejor cómo nuestro cerebro establece y mantiene las rutinas, esperamos llegar a comprender el modo en que podemos librarnos de hábitos indeseables y adquirir los que nos convienen.

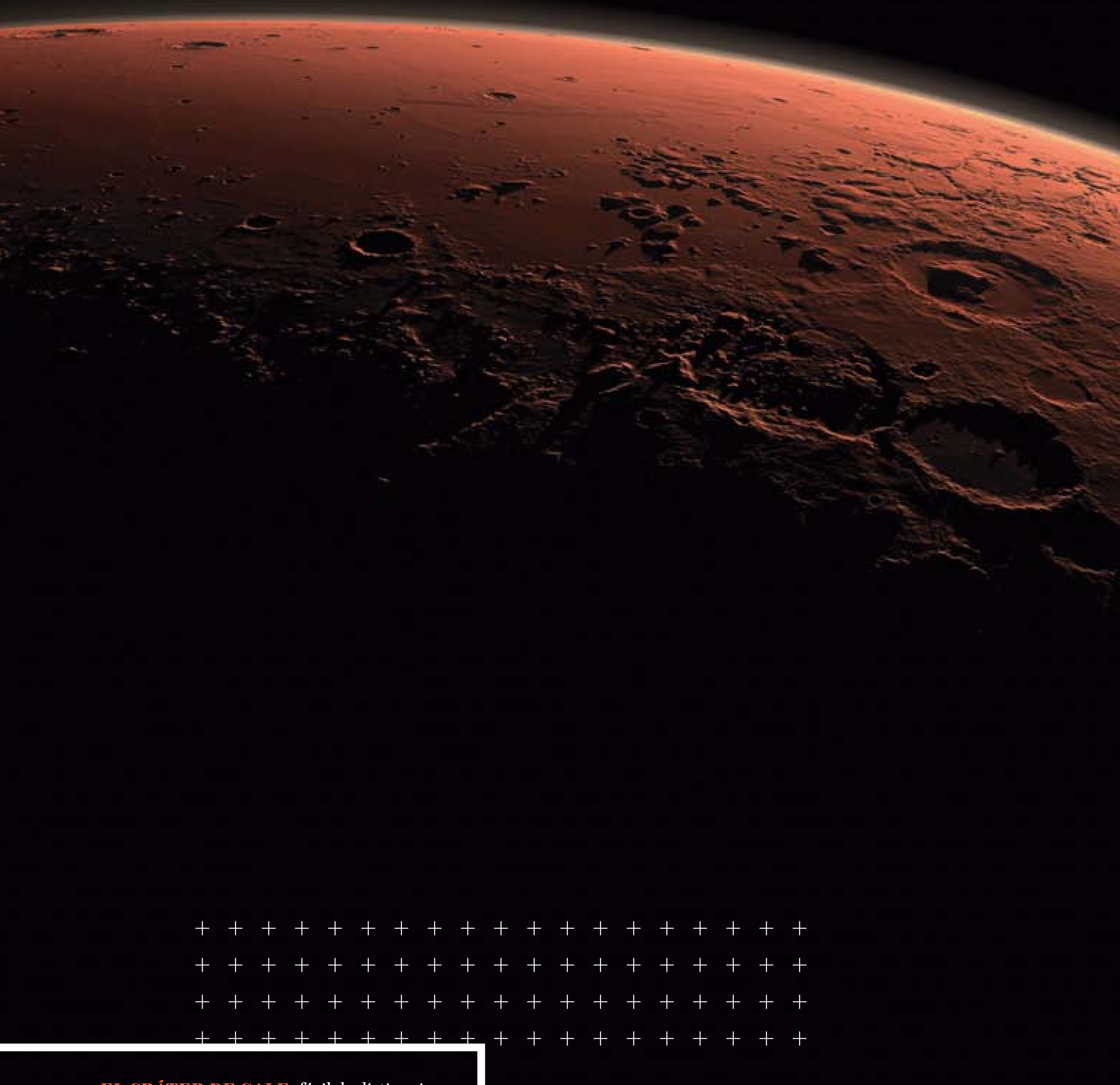
PARA SABER MÁS

Habits, rituals, and the evaluative brain. Ann M. Graybiel en *Annual Review of Neuroscience*, vol. 31, págs. 359-387, julio de 2008.
Human and rodent homologies in action control: Corticostriatal determinants of goal-directed and habitual action. Bernard W. Balleine y John P. O'Doherty en *Neuropsychopharmacology*, vol. 35, págs. 48-69, 2010.
Optogenetic stimulation of lateral orbitofronto-striatal pathway suppresses compulsive behaviors. Eric Burguière et al. en *Science*, vol. 340, págs. 1243-1246, junio de 2013.
A dual operator view of habitual behavior reflecting cortical and striatal dynamics. Kyle S. Smith y Ann M. Graybiel en *Neuron*, vol. 79, n.º 2, págs. 361-374, julio de 2013.

EN NUESTRO ARCHIVO

Control del cerebro por medio de la luz. Karl Deisseroth en *IyC*, enero de 2011.
La mente alegre. L. Kringelbach y Kent C. Berridge en *IyC*, octubre de 2012.

Varios experimentos en fase de desarrollo podrían zanjar una de las



EL CRÁTER DE GALE, fácil de distinguir por su montaña interior (*centro-izquierda en esta imagen compuesta*), tuvo agua líquida en el pasado. A principios de este año, el vehículo explorador *Curiosity* halló en él indicios de moléculas orgánicas.

cuestiones más profundas de la ciencia: ¿existe la vida extraterrestre?

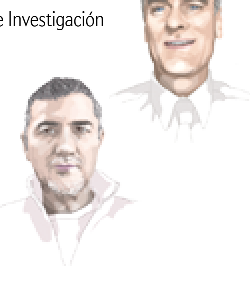
Christopher P. McKay y Víctor Parro García

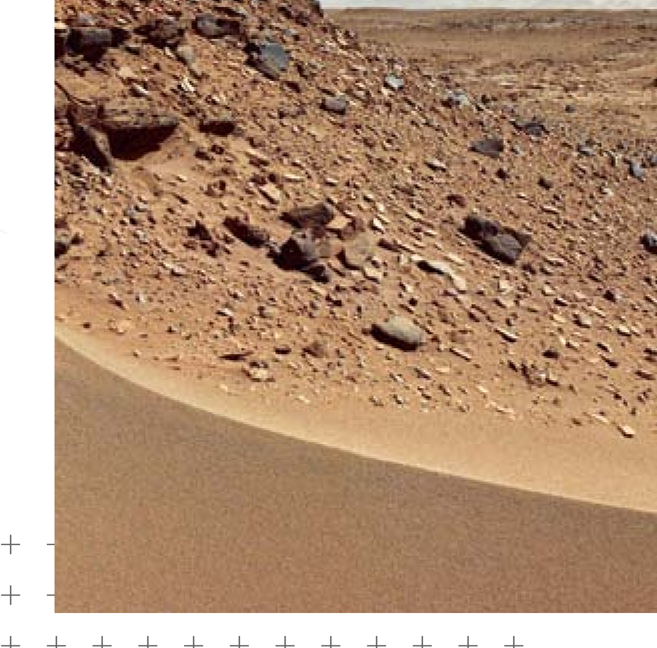
ASTROBIOLOGÍA

NUEVAS TÉCNICAS PARA BUSCAR VIDA EN MARTE

Chris McKay trabaja en el Centro de Investigación Ames de la NASA, en California.

Víctor Parro García es investigador del Centro de Astrobiología del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) y el CSIC, en Madrid.





Los astrónomos han aprendido mucho sobre Marte desde que las primeras sondas aterrizasen en el planeta rojo, hace casi cuatro décadas.

Hoy sabemos que el agua líquida fluyó alguna vez por su superficie y que, en su historia temprana, Marte y la Tierra guardaban grandes semejanzas. Cuando la vida surgió en nuestro planeta, hace unos 3500 millones de años, Marte era más cálido que en la actualidad y poseía océanos líquidos, un campo magnético activo y una atmósfera más gruesa. Dada la similitud entre ambos astros, parece razonable pensar que, cualesquiera que fueran los medios que propiciaron la aparición de vida en nuestro planeta, también podrían haberlo hecho en Marte.

Por lo que sabemos, el planeta rojo aún podría albergar vida microscópica. Sin embargo, durante los últimos 35 años, cada misión al astro vecino ha examinado sus aspectos geológicos, pero no los biológicos. Solo las sondas gemelas *Viking* 1 y 2, que aterrizaron en 1976, llevaron a cabo la primera y hasta ahora única búsqueda de vida en otro mundo. Cada una de ellas portaba cuatro experimentos destinados a tal fin, los cuales arrojaron datos ambiguos y crearon más controversias que respuestas. Sin embargo, hoy sabemos que, aunque hubiese vida en Marte, los métodos empleados por las *Viking* nunca la habrían encontrado. Por tanto, la cuestión de si el planeta rojo alberga vida sigue abierta.

Por fortuna, en las últimas décadas los microbiólogos han desarrollado un gran número de nuevas herramientas para detectar microorganismos. Aunque estos métodos ya no son excepcionales en la Tierra, si se empleasen en alguna de las varias misiones previstas a Marte podrían ofrecer una primicia: una respuesta definitiva a la pregunta de si la vida bulle o no en el planeta vecino.

PRIMERAS BÚSQUEDAS

Los experimentos a bordo de las *Viking* se basaban en las técnicas estándar de la época. En el primero de ellos, el módulo de aterrizaje tomó una cucharada de suelo marciano y añadió compuestos de carbono a modo de alimento para los posibles microorganismos. Si estos se encontraban presentes, cabía esperar que el alimento se consumiera y se liberase dióxido de carbono. Y, de hecho, eso fue lo que se observó. Por sí solo, el experimento parecía indicar la presencia de microorganismos. Sin embargo, cuando combinaron ese resultado con el de los otros ensayos, los investigadores ya no se mostraron tan seguros.

El segundo experimento buscó pruebas de fotosíntesis, pero no obtuvo resultados concluyentes. Un tercero añadió agua a una muestra de suelo. En caso de haber vida con cierta capacidad metabólica, el suelo húmedo tal vez emitiese dióxido de carbono. En su lugar, produjo oxígeno: un resultado muy extraño, ya que ningún suelo terrestre muestra dicho comportamiento. Los expertos llegaron a la conclusión de que el oxígeno observado procedía de una reacción química.

EN SÍNTESIS

Ninguna misión ha buscado vida en Marte desde el aterrizaje de las sondas *Viking*, en los años setenta. Aunque no hallaron pruebas concluyentes, hoy sabemos que aquellos experimentos estaban condenados al fracaso.

Una búsqueda moderna de vida en Marte emplearía nuevas técnicas microbiológicas, como los ensayos inmunológicos en formato de micromatriz, una clase de experimento hoy común en aplicaciones terrestres.

Tales experimentos podrían incluirse en alguna de las misiones programadas para viajar a Marte dentro de unos años, como la europea ExoMars, o en el sucesor del vehículo explorador *Curiosity*, proyectado por la NASA.



HOY SECO, el cráter de Gale albergó una vez un lago de agua líquida. El sucesor del robot *Curiosity* realizará experimentos a fin de comprobar si persisten trazas de vida.

El último experimento se dedicó a la búsqueda de compuestos orgánicos; es decir, compuestos de carbono esenciales para la vida. Si en Marte hubo alguna forma de vida, cabría encontrarlos. No obstante, su presencia no constituye, por sí sola, ninguna prueba concluyente de vida, ya que también se espera que numerosos compuestos orgánicos lleguen a la superficie del planeta a bordo de meteoritos. Curiosamente, el experimento no halló ningún indicio de tales sustancias.

Tomados en conjunto, los ensayos dejaron confusos a los investigadores. La mayor parte de ellos pensaba que las reacciones químicas eran las responsables de los resultados de los dos últimos experimentos. Sin embargo, la química por sí sola no bastaba para explicar el primero. Aunque una minoría —pequeña pero ruidosa— se aferró a la idea de que el primer experimento había encontrado indicios de vida, casi todo el mundo concluyó que Marte era estéril.

En 2008, treinta y dos años después de la llegada de las *Viking*, comenzó a vislumbrarse la solución a aquel rompecabezas. Ese año, la sonda *Phoenix*, de la NASA, se posó en una región cercana al polo norte marciano. Para sorpresa de todos, detectó perclorato, una molécula rara en la Tierra, compuesta por cuatro átomos de oxígeno unidos a uno de cloro y conectados a uno de magnesio o de calcio. A 350 grados Celsius, las sales de perclorato se descomponen y, en el proceso, liberan oxígeno y cloro reactivo. De hecho, los percloratos son tan reactivos que se emplean a menudo en el combustible para cohetes.

Aquel hallazgo hizo pensar a los investigadores que los percloratos tal vez hubiesen borrado los rastros de vida en suelo marciano. El experimento de las *Viking* dedicado a la búsqueda de compuestos orgánicos calentó primero la muestra a 500 grados Celsius, a fin de vaporizar cualquier molécula orgánica y detectarla luego en forma gaseosa. Pero, en 2010, un equipo dirigido por Rafael Navarro González, de la Universidad Nacional Autónoma de México, y del que formaba parte uno de nosotros (McKay), demostró que, durante el calentamiento, el perclorato habría destruido por completo todos los compuestos de carbono presentes en el suelo.

El perclorato también arrojó luz sobre el primer y el tercer experimento. En el primero, la adición de «alimento» al suelo generó dióxido de carbono. Pero, cuando se expone a los rayos cósmicos, el perclorato produce compuestos activos de cloro, los cuales pueden disociar moléculas orgánicas —como las que se encontraban en el «alimento»— y producir dióxido de carbono. En el tercer experimento, el oxígeno surgió del suelo humedecido. La producción de cloro a partir del perclorato también rinde oxígeno. Sin embargo, este permanece en un primer momento atrapado en el suelo y escapa solo después, una vez que el suelo se humedece. Dos misterios resueltos.

Con todo, la esperanza de descubrir vida en Marte no se ha desvanecido. El vehículo explorador *Curiosity* ha estado tomando muestras de suelo desde 2012, cuando llegó al planeta rojo. Este año, el equipo del instrumento de a bordo SAM, dirigido por Paul Mahaffy, del Centro Goddard de Vuelos Espaciales, y del que forma parte McKay, refirió el hallazgo de compuestos de carbono en rocas sedimentarias de grano fino en el fondo del cráter de Gale, incluso en presencia de perclorato. Por tanto, sí existen compuestos orgánicos en Marte. Simplemente, las *Viking* no lograron encontrarlos. ¿Podría haber ocurrido lo mismo con las huellas de vida?

ENFOQUES MODERNOS

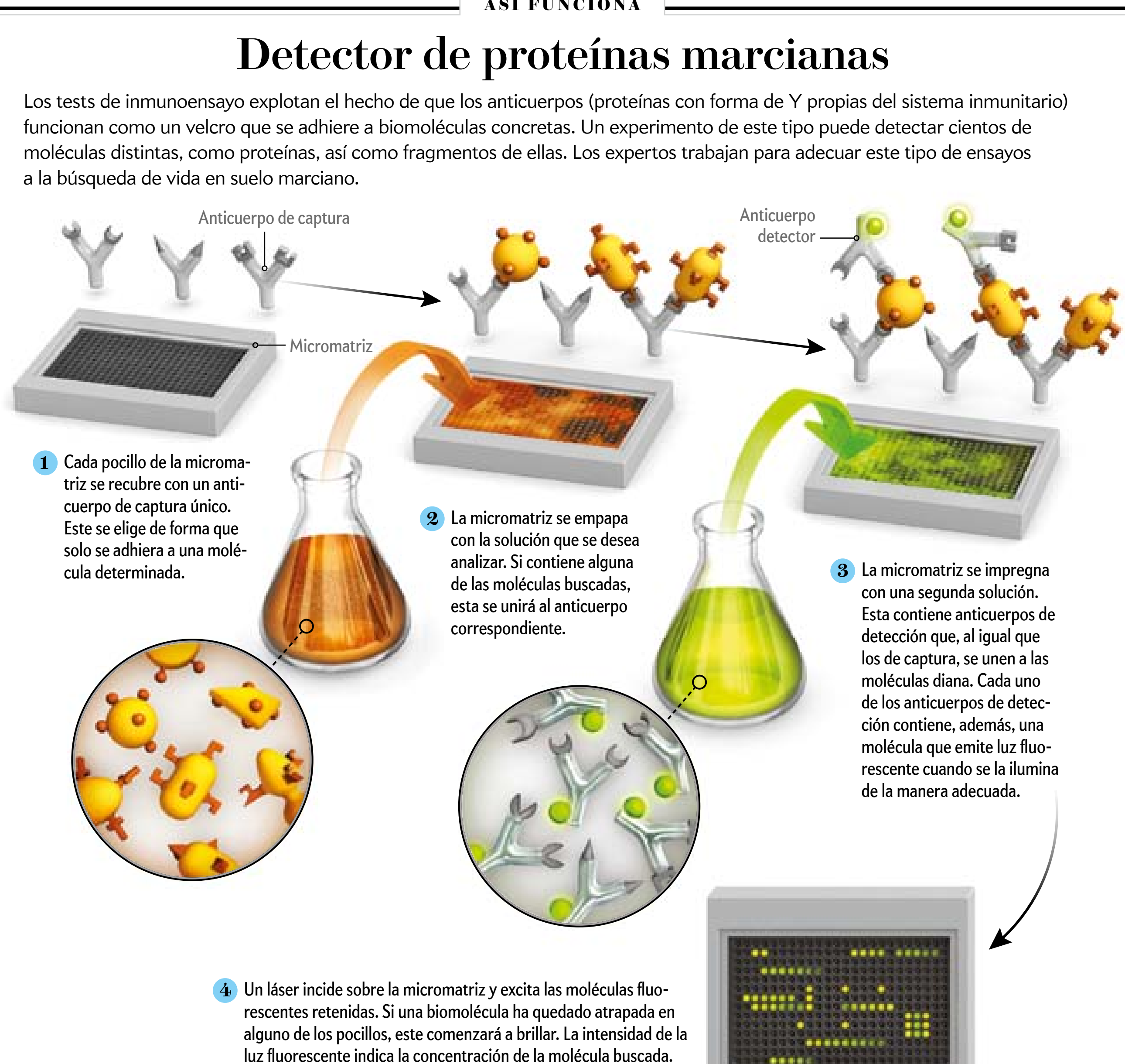
Durante los cuarenta años que han pasado desde que se construyeron las sondas *Viking*, la microbiología y las técnicas asociadas han evolucionado de manera drástica. Aquellas primeras misiones usaron métodos de cultivo similares a los que se emplean para hacer crecer microorganismos en una placa de Petri. Sin embargo, tales métodos ya no se consideran definitivos, pues sabemos que en dichos cultivos solo crece una pequeña fracción de los microbios del suelo. Con el tiempo se han desarrollado técnicas mucho más precisas, las cuales detectan directamente las biomoléculas de las formas de vida microbiana. Tales métodos proporcionan la base para una nueva forma de buscar huellas de vida en Marte.

La técnica más conocida consiste en detectar ADN y secuenciarlo. En la actualidad ya no es necesario cultivar un organismo y hacer que se replique numerosas veces a fin de obtener suficiente ADN para una secuenciación. Varios equipos están trabajando en formas de incorporar la tecnología necesaria en los instrumentos destinados a las próximas misiones a Marte. Con todo, uno de los inconvenientes que presenta la técnica de extracción de ADN es que, aunque se trata de una molécula consustancial a la vida terrestre, podría no serlo a las formas de vida alienígenas. O puede que tal vez exista, pero en una forma

ASÍ FUNCIONA

Detector de proteínas marcianas

Los tests de inmunoensayo explotan el hecho de que los anticuerpos (proteínas con forma de Y propias del sistema inmunitario) funcionan como un velcro que se adhiere a biomoléculas concretas. Un experimento de este tipo puede detectar cientos de moléculas distintas, como proteínas, así como fragmentos de ellas. Los expertos trabajan para adecuar este tipo de ensayos a la búsqueda de vida en suelo marciano.



EMILY COOPER

tan diferente que nuestros detectores de ADN no lo identifiquen como tal.

Por fortuna, Marte podría albergar otros biomarcadores, como proteínas y polisacáridos. Las primeras son largas cadenas compuestas de diversas mezclas de los 20 aminoácidos presentes en los seres vivos. Los aminoácidos se hallan en los meteoritos y, muy posiblemente, fueron un componente común del ambiente prebiótico de cualquier mundo. Por otra parte, los polisacáridos son cadenas largas de azúcares sintetizados por enzimas (proteínas que actúan como catalizadores biológicos).

La detección de moléculas tan complejas como una proteína o un polisacárido aportaría una prueba contundente de vida, entendida en un sentido amplio: como un sistema biológico que codifica información y que la emplea para construir moléculas complejas. Del mismo modo en que un rascacielos sobresaldría en un campo de rocas, dichas moléculas destacarían sobre cualquier fondo de sustancias prebióticas simples.

Uno de nosotros (Parro García) ha estado desarrollando un instrumento para detectar moléculas complejas en Marte. Este se basa en una técnica —el ensayo inmunológico en formato de micromatriz— que ya se emplea en la detección simultánea de cientos de tipos de proteínas, polisacáridos y otras biomoléculas, ADN incluido. Tales ensayos utilizan anticuerpos, proteínas con forma de Y que se unen a un solo tipo de biomolécula. La solución que se pretende analizar se vierte sobre una pequeña placa con múltiples pocillos, en cada uno de los cuales se ha dispuesto un tipo de anticuerpo diferente. Si la muestra contiene una biomolécula capaz de unirse a uno de ellos, el anticuerpo en cuestión la capturará y el experimento la identificará.

Una ventaja de los inmunoensayos radica en que los anticuerpos pueden detectar moléculas mucho más pequeñas y no tan complejas como las proteínas. Ello permite buscar moléculas relacionadas con la vida pero más sencillas, como fragmentos de proteínas o incluso aminoácidos. El hallazgo de

tales restos también indicaría que la vida existe o existió en el planeta vecino.

En conjunto, los organismos terrestres presentan millones de proteínas muy distintas. Con tantas posibilidades para elegir, ¿cómo seleccionar los pocos cientos que puede detectar un inmunoensayo? La respuesta corta es que resulta imposible saberlo a ciencia cierta. Sin embargo, podemos hacer algunas suposiciones razonables y dirigir la selección de acuerdo con dos estrategias. Por un lado, buscar proteínas útiles o esenciales para sobrevivir en Marte, como enzimas que consuman perclorato, otras adaptadas al frío y que permitan a los microorganismos sobrevivir en las gélidas temperaturas del planeta rojo, o enzimas que reparen los daños en el ADN causados por la radiación ionizante a la que se halla expuesto el astro. Por otro, también podemos buscar moléculas que sabemos presentes en todo el mundo microbiano, como el peptidoglucano (un componente universal de la pared de todas las células bacterianas) o el adenosín trifosfato (ATP, el cual es empleado por todos los organismos terrestres para transportar la energía química necesaria para la actividad metabólica).

Pero incluso si el agresivo ambiente marciano ha destruido las moléculas de gran tamaño, como el ADN y las proteínas, aún cabría encontrar huellas de vida entre sus restos. La clave reside en rastrear pautas características. Numerosas moléculas que resultan equivalentes desde un punto de vista químico pueden exhibir diferente «quiralidad»: es decir, sus enlaces pueden hallarse en una de dos configuraciones espaciales posibles (L y D), cada una de las cuales corresponde a la imagen especular de la otra. La vida en la Tierra se encuentra dominada por los aminoácidos de tipo L [*véase* «Moléculas especulares», por Sarah Everts; Investigación y Ciencia, enero de 2014]. Si un experimento detectase aminoácidos y encontrase un conjunto con quiralidad L dominante, podríamos tomarlo como una prueba convincente de la presencia de vida. Por otro lado, si la quiralidad fuese la contraria (D), podríamos concluir que las formas de vida marcianas evolucionaron con independencia de las terrestres.

PLANIFICAR LA MISIÓN

Podemos imaginar una misión a Marte que portase tres instrumentos dedicados a la búsqueda de biomarcadores: un detector de ADN, un microchip para inmunoensayos y un dispositivo para detectar y caracterizar aminoácidos. La tecnología necesaria está casi lista. La siguiente tarea consistiría en elegir la ubicación del planeta con la mayor probabilidad de albergar biomarcadores.

El hielo y la sal son «amigos» de los biomarcadores, pues los protegen de los posibles daños y de la degradación. ¿Los enemigos? La radiación ionizante y el calor. Por fortuna, las bajas temperaturas de Marte hacen que la descomposición térmica resulte insignificante incluso en escalas de tiempo geológicas. La radiación ionizante, sin embargo, podría destruir en pocos miles de millones de años aquellos biomarcadores enterrados a un metro de subsuelo. Las áreas más prometedoras son, pues, aquellas con hielo que pueda haber albergado vida en el pasado (como el lugar de aterrizaje de la sonda *Phoenix*, cerca del polo norte marciano) o sitios donde la erosión reciente haya dejado expuesto material antiguo. En todo caso, habría que perforar el terreno para extraer muestras situadas a un metro o más de profundidad.

Varias misiones a Marte que actualmente se encuentran en fase de planificación podrían llevar a cabo tales búsquedas. La europea ExoMars, prevista para 2018, transportará un taladro para extraer muestras enterradas hasta dos metros por debajo de la superficie. Hace poco, la NASA anunció planes para iniciar en 2020 una réplica del vehículo explorador *Curiosity*. ExoMars y el nuevo *Curiosity* podrían buscar biomarcadores en los depósitos salinos y sedimentarios de las regiones ecuatoriales secas de Marte. (Ninguno de los vehículos puede operar en las regiones polares.)

En cuanto a la búsqueda en las zonas polares o próximas a ellas, la NASA está estudiando la posibilidad de enviar un módulo de aterrizaje de bajo coste: *Icebreaker*. Equipado con un taladro de un metro y con un instrumento para efectuar inmunoensayos, el ingenio podría buscar biomarcadores en el suelo cementado por hielo del permafrost rico en agua del norte del planeta.

Cualquiera de esas misiones constituiría un digno candidato a liderar la próxima era de la exploración de Marte. Las investigaciones de las últimas décadas no han dejado duda alguna de que Marte albergó agua líquida en el pasado. Ahora ha llegado el momento de comprobar si el otrora húmedo planeta alojó vida. En caso de hallar moléculas biológicas y, sobre todo, si estas indicasen que la vida marciana surgió de manera independiente a la terrestre, habríamos ganado una visión muy profunda sobre la vida en el cosmos. Así como hoy sabemos que existen multitud de estrellas y planetas, comprobaríamos que también hay varias biologías. Sabríamos que la vida en el universo bulle con diversidad.



AUTORRETRATO: El vehículo explorador *Curiosity*, en el lugar de su primera perforación. Debido a la radiación ionizante, los posibles microorganismos habrían de medrar bajo la superficie marciana.

CORTESÍA DE LA NASA/JPL/CALTECH Y MALIN SPACE SCIENCE SYSTEMS

PARA SABER MÁS

Página web del experimento SOLID (Signs of Life Detector): **auditore.cab.inta-csic.es/solid/es**
Programa de exploración de Marte de la NASA: **mars.jpl.NASA.gov**

EN NUESTRO ARCHIVO

La búsqueda de vida en Marte. Norman H. Horowitz en *IyC*, enero de 1978.
Agua en Marte. Jim Bell en *IyC*, febrero de 2007.
Buscando vida en Marte. Peter H. Smith en *IyC*, enero de 2012.
Marte en movimiento. Alfred S. McEwen en *IyC*, julio de 2013.

MICROBIOLOGÍA

GENÉTICA DE LA RESISTENCIA MICROBIANA

Cartografiar el intercambio de genes entre las bacterias inocuas y las patógenas abre nuevos caminos en la lucha contra las cepas resistentes a los antibióticos

Gautam Dantas y Morten O. A. Sommer

EN SÍNTESIS

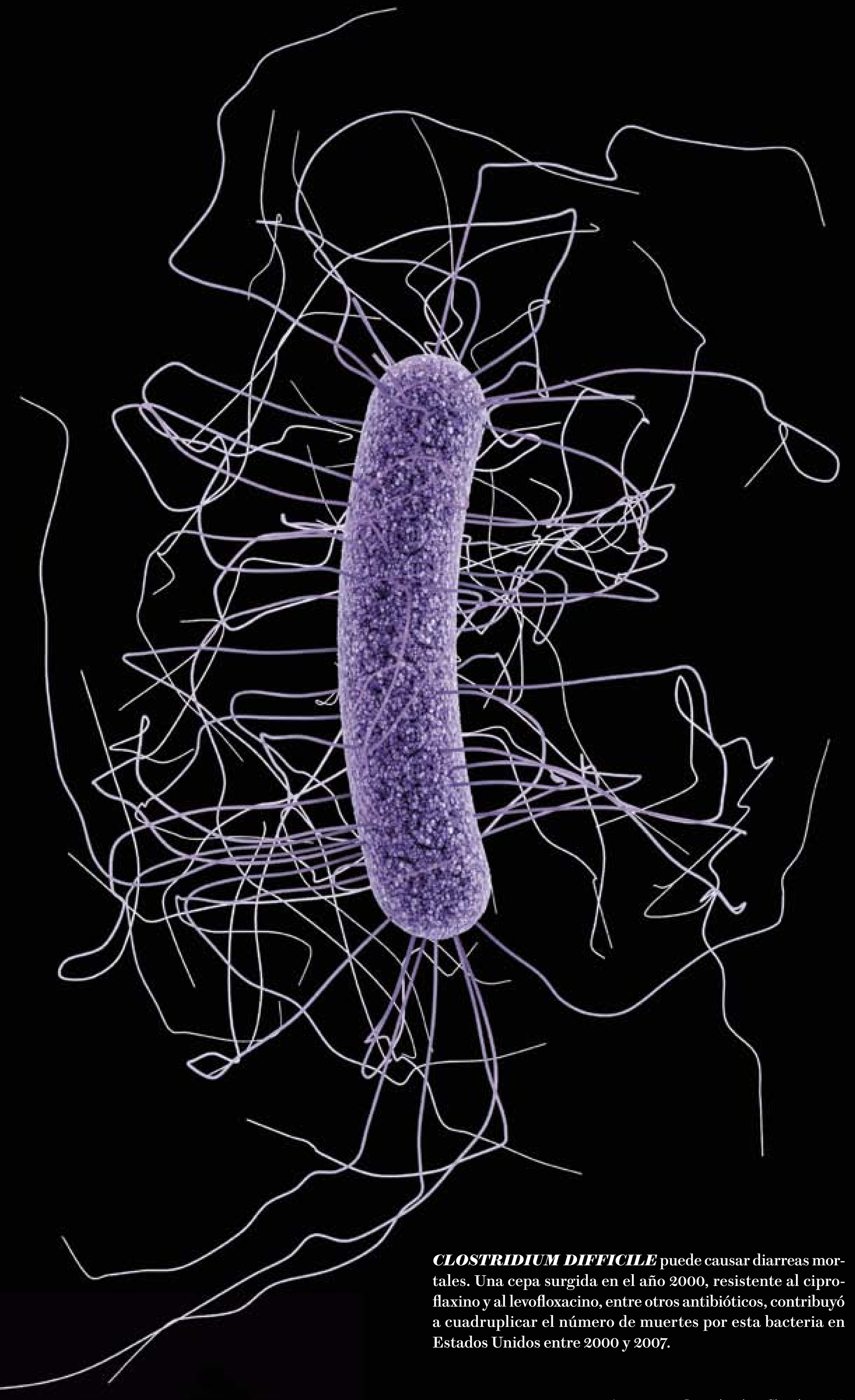
Desde el descubrimiento y empleo a gran escala de los antibióticos, numerosos patógenos a los que se había considerado vencidos no han cesado de desarrollar resistencia a estos medicamentos.

Para averiguar cómo logran sobrevivir las bacterias ante los antibióticos, los investigadores estudian el resistoma, el conjunto de genes que transforma un patógeno vulnerable en resistente.

El estudio del resistoma del organismo humano y de otros entornos naturales demuestra que se había infravalorado la cantidad de genes de resistencia. El intercambio frecuente de estos entre distintas especies y ambientes ha favorecido la difusión de la resistencia.

Este conocimiento ofrece una base más sólida a la hora de plantear nuevas estrategias contra las enfermedades infecciosas que se han vuelto intratables.

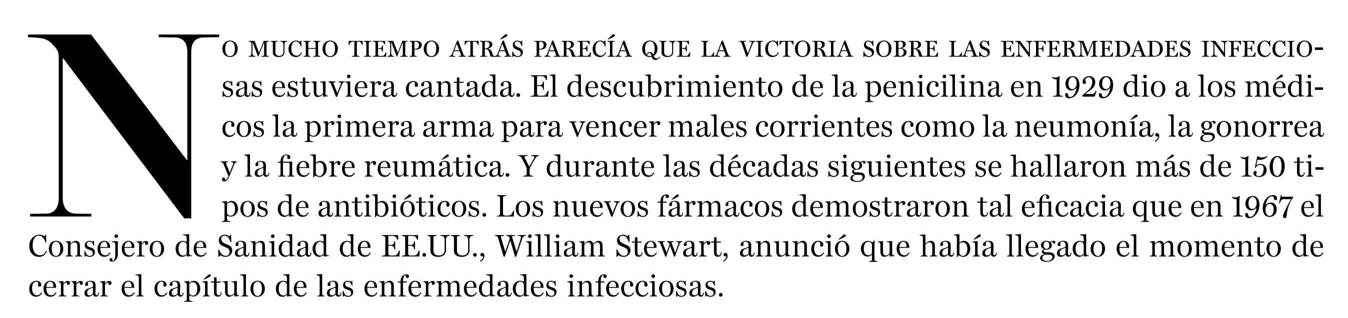
SCIENCE SOURCE



CLOSTRIDIUM DIFFICILE puede causar diarreas mortales. Una cepa surgida en el año 2000, resistente al ciprofloxacino y al levofloxacino, entre otros antibióticos, contribuyó a cuadruplicar el número de muertes por esta bacteria en Estados Unidos entre 2000 y 2007.

Gautam Dantas es profesor de patología, inmunología e ingeniería biomédica y miembro del Centro de Ciencias Genómicas y Biología de Sistemas de la Universidad de Washington en San Luis, Misuri.

Morten O. A. Sommer es profesor de biología de sistemas y miembro del Centro para la Biosostenibilidad de la Fundación Novo Nordisk en la Universidad Politécnica de Dinamarca.



NO MUCHO TIEMPO ATRÁS PARECÍA QUE LA VICTORIA SOBRE LAS ENFERMEDADES INFECCIOSAS estuviera cantada. El descubrimiento de la penicilina en 1929 dio a los médicos la primera arma para vencer males corrientes como la neumonía, la gonorrea y la fiebre reumática. Y durante las décadas siguientes se hallaron más de 150 tipos de antibióticos. Los nuevos fármacos demostraron tal eficacia que en 1967 el Consejero de Sanidad de EE.UU., William Stewart, anunció que había llegado el momento de cerrar el capítulo de las enfermedades infecciosas.

Stewart y la mayoría de sus coetáneos subestimaron gravemente la capacidad de adaptación de las bacterias patógenas a esos medicamentos proverbiales. Y es que, casi desde el mismo momento en que la penicilina comenzó a emplearse en los hospitales en 1946, surgieron las primeras bacterias resistentes. En la época dorada del descubrimiento de los antibióticos, entre 1940 y finales de los años sesenta, la propagación de la resistencia quedó compensada por la incesante aparición y difusión de nuevos tipos de antimicrobianos; pero en los años setenta, el creciente desinterés, aunado con la menor capacidad de la industria farmacéutica para sintetizar nuevos compuestos, condujo a cuatro largas décadas en las que ningún nuevo antibiótico de amplio espectro vio la luz. Los laboratorios prefirieron invertir sus esfuerzos en modificar la estructura química de las clases de antibióticos autorizadas.

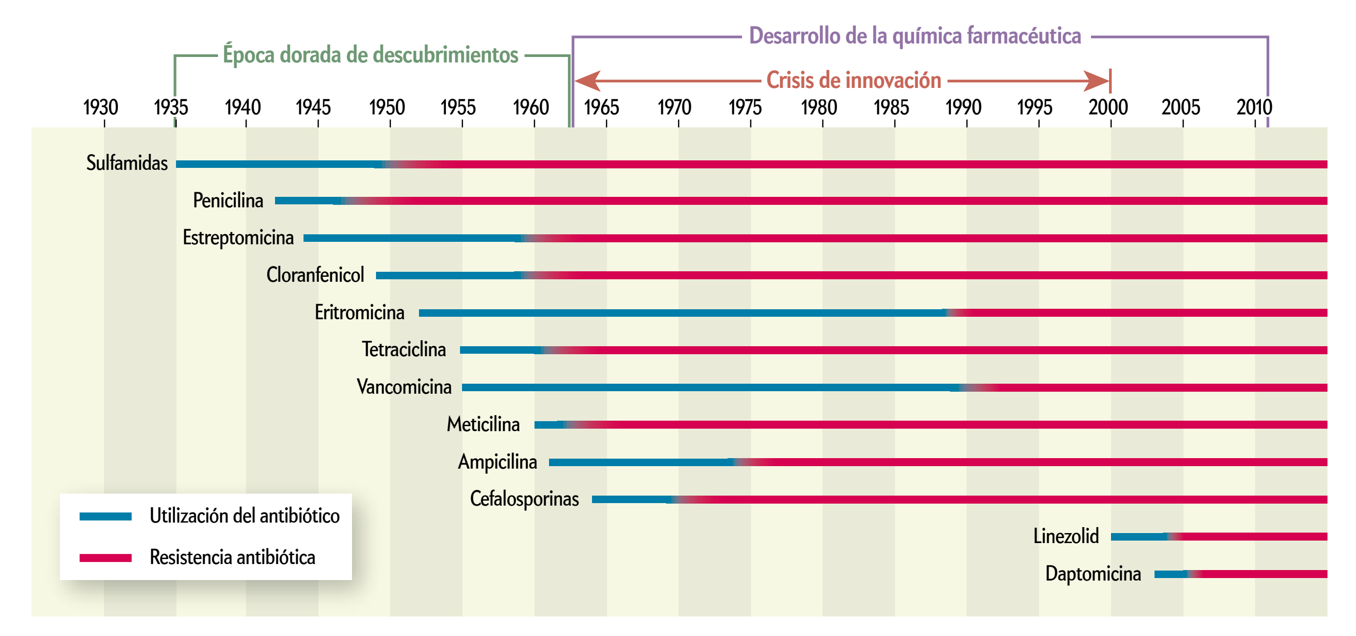
Pero durante esa crisis de innovación, las bacterias no cesaron de mutar y los fármacos que en otro tiempo habían combatido múltiples patógenos acabaron arrinconados por su ineficacia. Algunas cepas de bacterias, como *Escherichia coli* y *Klebsiella pneumoniae,* muestran hoy resistencia a los principales tipos de antibióticos, incluso a los carbapenémicos, que durante mucho tiempo fueron el último recurso contra las infecciones pulmonares, entre otras. Con cada vez menos opciones, la mortalidad por esas dolencias ronda ya el 50 por ciento en Estados Unidos. En ciertas enfermedades, vivimos hoy una situación nunca vista desde la difusión de los antibióticos.

Un informe publicado en septiembre de 2013 por los Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades (CDC) de EE.UU. afirma que el tratamiento de las infecciones resistentes a los antibióticos acarrea un coste anual de 35.000 millones de dólares y 8 millones de días de hospitalización para el país. Un reciente brote de *Salmonella* resistente que contaminó carne de pollo produjo cerca de 300 intoxicaciones en 18 estados, con bebés y nonagenarios afectados por igual. En EE.UU. fallecen cada año al menos 23.000 personas a causa de las infecciones, muchas provocadas por *Staphylococcus aureus* resistente a la meticilina (SARM), porque se han agotado los antibióticos eficaces contra ellas.

Las autoridades sanitarias están pensando en ofrecer incentivos para el desarrollo de nuevos antimicrobianos, pero tales iniciativas aún no han surtido el efecto deseado. Fruto de esta situación, el número de antibióticos autorizados por la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos (FDA) ha marcado un triste récord: solo se ha creado un antibiótico nuevo en el lustro de 2008 a 2012, frente a los dieciséis aprobados entre 1983 y 1987. El director de los CDC, Tom Frieden, advirtió hace poco que si no se actuaba de inmediato, se agotarían los recursos y no se dispondría de los medicamentos necesarios para salvar vidas. En realidad, el desarrollo de estos solo es una parte de la solución, puesto que los patógenos seguirán creando resistencia incluso contra los más eficaces.

La salvaguarda de los antibióticos exige descubrir qué ocurre en las bacterias patógenas cuando se vuelven resistentes. Los investigadores intentan averiguarlo estudiando el conjunto de genes que transforma un patógeno vulnerable en uno superresistente: el resistoma. Hasta hoy, la mayoría de los trabajos sobre la resistencia antibiótica habían tenido por protagonistas a las bacterias causantes de enfermedades, pero las últimas in-

SIGMA XI/AMERICAN SCIENTIST



LA APARICIÓN DE BACTERIAS RESISTENTES (*rojo*) **siempre ha seguido muy de cerca al empleo de los nuevos antibióticos (*azul*). Durante la época dorada de los descubrimientos se desarrollaron 150 tipos de antibióticos. Desde entonces, la difusión de la resistencia ha sobrepasado ampliamente el ritmo de desarrollo de nuevos fármacos. La Sociedad de Enfermedades Infecciosas de EE.UU. calcula que el 70 por ciento de las infecciones contraídas en los hospitales y centros de salud de ese país están causadas por bacterias resistentes a uno o varios antibióticos.**

vestigaciones de quienes escriben estas líneas y de otros grupos han desplazado el foco de atención hacia los resistomas de las bacterias no patógenas. Los grandes avances acaecidos en la secuenciación del ADN en la pasada década han abierto la puerta al estudio del genoma de ambos tipos de microorganismos (patógenos y no patógenos) en diversos entornos naturales.

Tales trabajos han mejorado el conocimiento sobre cómo evoluciona la resistencia antibiótica en especies bacterianas concretas y cómo se transmite esta propiedad entre especies y ambientes distintos. Nos hallamos muy lejos de la victoria proclamada por Stewart, pero los últimos avances están ayudando a idear nuevas estrategias para ganar la batalla que mantenemos contra las bacterias resistentes desde hace noventa años. Conocer los factores que influyen en la evolución y propagación del resistoma podría extender la vida útil de los fármacos y señalar el camino hacia nuevas tácticas contra las enfermedades infecciosas.

LOS ORÍGENES DE LA RESISTENCIA

Las bacterias patógenas pueden adquirir resistencia a los antibióticos a través de dos vías: la vertical, con la acumulación de cambios genéticos durante el proceso natural de replicación del genoma, y la horizontal, mediante la transmisión de genes de resistencia entre microbios.

La trasmisión vertical es el proceso evolutivo fundamental por el cual el genoma de la célula acumula errores durante la replicación y engendra una descendencia genéticamente distinta de sus antecesores bacterianos. El número de errores generados durante la replicación es bastante bajo, por lo que, en circunstancias normales, solo una de cada mil bacterias incorpora un error, o mutación, en el genoma. No todas las mutaciones son beneficiosas, pero una de cada mil millones da lugar a un mutante que puede crecer más rápido o que tolera concentraciones de antibióticos más altas que sus antecesores. Si las bacterias mutantes quedan expuestas a los antibióticos, las portadoras de genes de resistencia proliferarán hasta desplazar a las demás, que acabarán desapareciendo. Suelen necesitarse varios ciclos de mutación y selección para desarrollar una resistencia antibiótica elevada.

Los genes surgidos de este modo pueden ser cedidos de un tipo de bacterias a otro mediante la transferencia horizontal de genes. Si bien algunos patógenos adquieren resistencia por transmisión vertical, estudios recientes apuntan a que la vía horizontal puede ser el principal motor de la difusión de la resistencia antibiótica. En la transferencia horizontal, los genes de resistencia se insertan en elementos genéticos móviles y son acarreados de una célula a otra. Tales elementos pueden corresponder a segmentos lineales o circulares de ADN, llamados plásmidos, que la célula replica junto con el genoma principal.

Los fragmentos de ADN acceden a nuevas células por medio de tres mecanismos: transformación, transducción y conjugación. En el primero de ellos, las células microbianas absorben restos de ADN de bacterias muertas y los insertan en su genoma. La transducción consiste en la transferencia de material genético a través de virus bacteriófagos (los que infectan bacterias). Los virus introducen su ADN en el genoma bacteriano, donde permanece inserto durante muchas generaciones antes de volver a ser empaquetado y abandonar la célula en busca de otra nueva. En el éxodo, las partículas víricas pueden arrastrar por accidente un segmento del genoma de la célula hospedadora, que llevarán consigo como un polizón.

Por último, los genes de resistencia pueden pasar de un microbio a otro mediante la conjugación. El descubrimiento de este proceso, hoy considerado el principal mecanismo de transferencia horizontal de genes, le valió a Joshua Lederberg el premio Nobel de medicina en 1958. En la conjugación, los plásmidos acaparan la maquinaria celular para crear unas estructuras llamadas pili, que sobresalen de la célula donante y

penetran en la membrana de la célula receptora. A través de ellos se transfieren los plásmidos conjugativos y todas las funciones que codifican. Numerosos patógenos nosocomiales (los adquiridos en hospitales o centros de salud), como las citadas bacterias resistentes a los carbapenémicos, albergan grandes plásmidos conjugativos con decenas de genes de resistencia que confieren a las células receptoras inmunidad contra casi todos los antibióticos.

Las últimas campañas de secuenciación del genoma de bacterias patógenas, llevadas a cabo por grupos como los del británico Instituto Wellcome Trust Sanger y el estadounidense Instituto Broad, han añadido otro giro más a este conocimiento. Se ha demostrado así que los patógenos pueden adquirir todos los genes de resistencia por transferencia horizontal a partir de otro reservorio génico como el suelo urbano, las aguas residuales o la carne procesada. Existe un enorme interés por caracterizar dichos reservorios, ya que permitiría conocer mejor la influencia de este mecanismo en la evolución de la resistencia bacteriana a los antibióticos.

EL CONTRAATAQUE DE LOS PATÓGENOS

De la misma manera que las bacterias hacen gala de diversos mecanismos para adquirir los genes de resistencia antibiótica, los propios genes recurren a varias estrategias para codificar esa resistencia. Este tipo de genes pueden dividirse a grandes rasgos en cuatro categorías según el mecanismo de neutralización del antibiótico.

Las bacterias dotadas de una barrera impermeable son resistentes naturales a ciertos antimicrobianos, bien porque carecen de la diana contra la que actúa el fármaco, bien porque sus membranas son impermeables a este.

En un segundo grupo de bacterias, los genes adquieren mutaciones que modifican la diana del antibiótico y merman su eficacia. Cada fármaco está diseñado para actuar contra un proceso bacteriano concreto. De este modo, las fluoroquinolonas integran un grupo de antibióticos muy empleado contra las infecciones cutáneas, pulmonares y urinarias. Reconocen el ADN y alteran el funcionamiento de las proteínas encargadas del desenrollamiento de la hélice de ADN durante la replicación. Las mutaciones que confieren resistencia contra las fluoroquinolonas suelen cambiar la conformación de esas proteínas, lo que disminuye la unión del fármaco a su diana y aumenta la concentración necesaria de este para impedir el proceso.

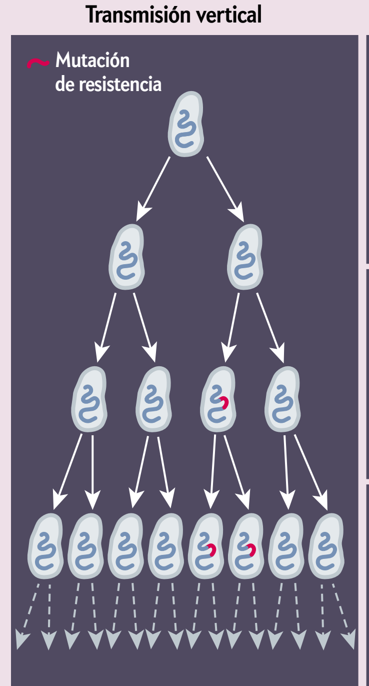
La tercera estrategia se basa en la modificación del antibiótico. En esta, el gen de resistencia codifica una enzima que lo degrada o altera antes de que pueda matar la bacteria. Esta táctica es muy habitual contra los betalactámicos, los antibióticos más numerosos y prescritos y a los que pertenece la célebre penicilina. La penicilina inhibe las enzimas que remodelan la pared bacteriana y que son esenciales para el crecimiento celular. Las principales responsables de la resistencia contra ella son las betalactamasas, unas enzimas que rompen la molécula de antibiótico y neutralizan su efecto inhibidor.

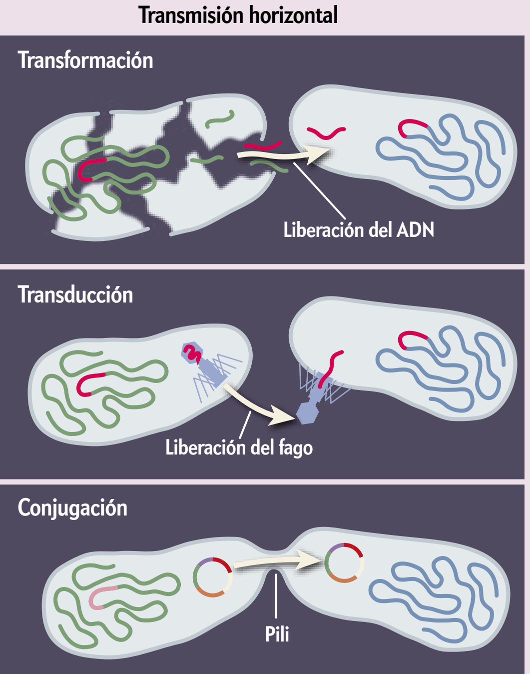
Un último tipo de genes de resistencia codifican proteínas que bombean el antibiótico fuera de la célula y mantienen la concentración interna lo bastante baja para evitar la inhibición. Este mecanismo de resistencia actúa contra todos los antibióticos cuyas dianas se hallan ubicadas en el interior de la célula; a menudo, las bombas expulsan varios antibióticos distintos, lo cual se traduce en multirresistencia. Un ejemplo es la tetraciclina, empleada contra infecciones muy diversas; la resistencia a

MECANISMOS DE TRANSMISIÓN

Propagación de genes de resistencia

La resistencia antibiótica puede adquirirse de dos formas básicas. En la transmisión vertical, el genoma de la bacteria acumula errores o mutaciones durante la replicación; algunos de esos cambios (*rojo*) confieren resistencia a los antibióticos y se transmiten a las generaciones posteriores. En la transmisión horizontal, los microbios intercambian genes de resistencia. Tiene lugar a través de tres mecanismos: transformación (asimilación de genes de resistencia de bacterias muertas que la bacteria «carroñera» incorpora a su genoma), transducción (transferencia de genes de resistencia mediada por bacteriófagos) y conjugación (traspaso de genes de una célula bacteriana a otra por medio de tubos llamados pili).





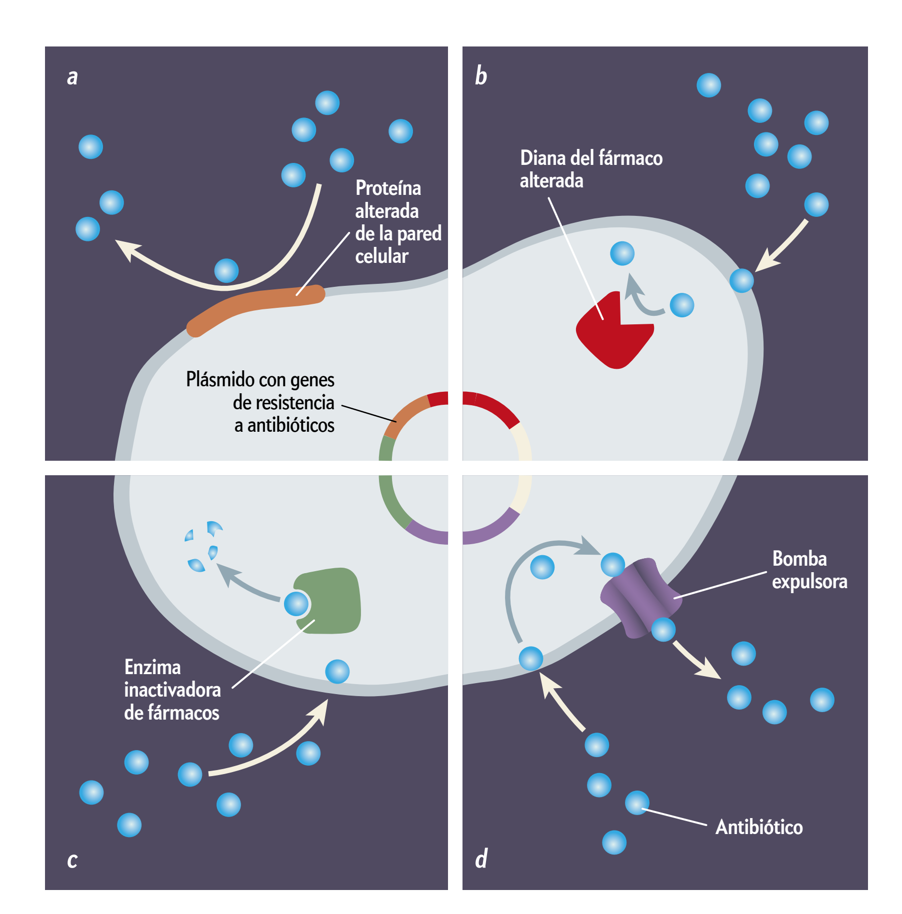
SIGMA XI/AMERICAN SCIENTIST

ella puede radicar en genes que codifican proteínas insertadas en la membrana bacteriana que expulsan el antibiótico.

Para complicar más las cosas, la resistencia suele obedecer a una combinación de varios mecanismos. Así, la correspondiente a la tetraciclina conjuga la modificación de la diana, la alteración del antibiótico y los mecanismos de expulsión.

A pesar de que el término resistoma antibiótico se acuñó hace solo un lustro, el concepto condensa décadas de investigación sobre la evolución y la trasmisión de los genes de resistencia entre microbios y entornos distintos. La definición de resistoma designa el conjunto de genes de un microorganismo o grupo de microorganismos que les permite sobrevivir ante los antibióticos. Abarca todos los genes de resistencia de un grupo, sea cual sea su escala: desde una sola célula hasta la microbiota completa de una muestra ambiental.

Numerosos datos indican que casi todos los ambientes microbianos acogen resistomas antibióticos. La miríada de actividades naturales y humanas influye en el intercambio dentro y entre distintos entornos, y una compleja red de interrelaciones conecta los resistomas. El suelo y el cuerpo humano constituyen dos ambientes primordiales para la evolución y el intercambio del resistoma.



LAS BACTERIAS pueden contrarrestar el efecto de los antibióticos y volverse resistentes a ellos mediante cuatro mecanismos: su membrana celular se vuelve impermeable al medicamento y forma una barrera que impide la entrada del antibiótico (*esferas azules*) (*a*); la célula altera las proteínas que constituyen la diana del antibiótico y evita la unión a ellas (*b*); sintetiza una enzima que neutraliza el medicamento (*c*); o codifica enzimas que ayudan a la expulsión o bombeo del antibiótico fuera de la célula (*d*).

EL RESERVORIO DEL SUELO

La resistencia a los antibióticos es ubicua y se halla presente hasta en nuestro propio jardín. Los microbios edáficos representan tal vez el reservorio evolutivo de la mayoría de esa resistencia, y el resistoma del suelo es, con mucho, el más grande y diverso de todos. La mayor parte de los antibióticos utilizados en medicina son o derivan de productos naturales sintetizados por microorganismos de ese medio, principalmente del género *Streptomyces*, perteneciente al filo Actinomicetos.

En 1973, Julian Davies, actualmente en la Universidad de la Columbia Británica, y sus colaboradores plantearon por primera vez la idea del resistoma en la llamada hipótesis del productor, que explica el origen de la resistencia clínica. El investigador argumentaba que los actinomicetos «productores» debían de contar con elementos que los protegieran contra los antibióticos sintetizados por ellos mismos. Estos elementos eran, por definición, genes de resistencia. Los antibióticos debieron de aparecer hace cientos de millones de años, por lo que probablemente tales genes son tan antiguos como ellos.

Las bacterias no productoras de antibióticos (incluidas algunas patógenas) habrían adquirido los genes de resistencia de las productoras o de sus vecinas del suelo, que los habrían desarrollado en respuesta a la presión selectiva ejercida por los antibióticos liberados de modo natural por otros microbios edáficos. De hecho, el grupo de Davies demostró que las bacterias del suelo *Streptomyces*, en general inofensivas, codifican enzimas de resistencia que alteran los antibióticos aminoglucósidos y que son idénticas a las presentes en patógenos clínicos.

En los cuarenta años transcurridos desde la propuesta de Davies, un gran número de estudios ha refrendado su hipótesis y la ha perfilado. Un artículo trascendental de Gerry Wright y sus colaboradores de la Universidad McMaster publicado en 2006, que además introdujo formalmente el concepto de resistoma, demostró que 400 muestras de *Streptomyces* aisladas del suelo al azar eran multirresistentes a un nutrido grupo de antibióticos de importancia clínica. Por término medio, resistían a siete u ocho fármacos (una lo hizo a 15 de los 21 estudiados), algunos de ellos totalmente sintéticos y autorizados hacía muy poco. Los resultados de Wright causaron sorpresa porque ese grado de multirresistencia superaba al conocido en muchos patógenos.

En 2008, nuestro grupo publicó un estudio que amplió aún más la visión del resistoma edáfico al describir cerca de 600 especies pertenecientes a tres de los 60 filos o divisiones del reino de las bacterias (en concreto, Proteobacterias, Bacteroidetes y Actinomicetos) capaces de medrar en presencia de antibióticos. Dichos microorganismos eran resistentes, en promedio, a 17 de los 18 fármacos estudiados, una proporción insólita que se atribuyó a las condiciones de elevada presión selectiva de los cultivos por las concentraciones extremadamente altas de antibiótico.

El descubrimiento de la ubicuidad de la multirresistencia en la microbiota del suelo indica que el resistoma de este medio

podría ser inmenso. Estudios complementarios de los genes de resistencia corroboran la predicción. Numerosos ensayos que han empleado la técnica de reacción en cadena de la polimerasa (PCR, por sus siglas en inglés) para ampliar pequeñas muestras de ADN apuntan a que el resistoma edáfico habría sido enriquecido por la actividad humana. David Graham y sus colaboradores, de la Universidad de Newcastle, analizaron un conjunto de muestras de suelo originarias de Holanda y archivadas entre 1940 y 2008 para determinar la presencia y la abundancia de varios tipos de genes de resistencia. Descubrieron así un drástico aumento de los genes contra los betalactámicos, los macrólidos y las tetraciclinas durante el período estudiado, una dinámica que coincide con la fabricación de los antibióticos a gran escala.

Los datos sobre los genes de resistencia edáficos conocidos son solo la punta del iceberg. El equipo de Jo Handelsman, hoy en la Universidad Yale, fue pionero en el empleo de la metagenómica funcional sin cultivo, una técnica que proporciona la composición génica de muestras ambientales y permite caracterizar los resistomas edáficos tanto en entornos humanizados como vírgenes. El equipo descubrió nuevos genes de resistencia, algunos con mecanismos inéditos. Considerados en conjunto, los estudios indican que el resistoma del suelo es antiguo, diverso y ha sido enriquecido por la actividad humana en tiempos modernos. El grupo de Wright ha demostrado que es muy anterior al uso clínico de los antibióticos. En 2011 secuenciaron el ADN de muestras de permafrost de Beringia de 30.000 años de antigüedad y revelaron los ancestros evolutivos de los genes de resistencia a medicamentos tan importantes como los betalactámicos, las tetraciclinas y la vancomicina.

Uno esperaría que el conocimiento sobre el alcance y la profundidad del resistoma edáfico habría confirmado la predicción fundamental de la hipótesis del productor; es decir, que los genes de resistencia de los patógenos clínicos se hallan también en las bacterias del suelo, lo que indicaría un intercambio reciente entre el resistoma de ambos medios. Pero, sorprendentemente, hasta hace muy poco ese tipo de datos brillaban por su ausencia. La inmensa mayoría de los estudios sobre el resistoma edáfico apenas habían revelado semejanzas con los genes de resistencia de las bacterias patógenas.

A fin de explicar ese resultado inesperado, planteamos la hipótesis de que un subgrupo clave de bacterias del suelo, las proteobacterias, podrían ser el canal de intercambio con las bacterias patógenas. Nuestro razonamiento se basaba en que la mayor parte de la problemática clínica de la multirresistencia tiene su origen en este grupo de microorganismos, por lo que sus homólogos del suelo podrían mostrar indicios de intercambios recientes del resistoma.

Nos propusimos poner a prueba la idea con medios de crecimiento selectivos. Obtuvimos unos 100 cultivos de bacterias edáficas multirresistentes, mayoritariamente proteobacterias. Determinamos el perfil de los resistomas con una estrategia novedosa que integra selecciones metagenómicas funcionales

TÉCNICAS NOVEDOSAS

Explorar la resistencia fuera de la placa de Petri

En las primeras décadas que siguieron al descubrimiento de los antibióticos se investigó el incipiente problema de la resistencia a estos fármacos mediante el cultivo de bacterias de interés. La dependencia de tales métodos se remonta hasta el fundador de la bacteriología moderna, Robert Koch, cuyos trabajos convirtieron el cultivo puro en el método de referencia de los laboratorios de microbiología clínica. Ahora sabemos que el cultivo puro pasa por alto el creciente número de enfermedades que no están causadas por una sola bacteria patógena, sino por varias que actúan de forma concertada. Además, la mayoría de los microbios ambientales no pueden cultivarse con facilidad en el laboratorio. Los últimos avances técnicos han propiciado la aparición de tres estrategias sin cultivo que permiten analizar en profundidad la resistencia antibiótica, en bacterias tanto patógenas como inocuas.

La **reacción en cadena de la polimerasa** (PCR) amplifica de forma selectiva genes de resistencia específicos en las complejas comunidades microbianas, lo que permite su rápida identificación. La técnica es idónea para el estudio de la prevalencia de genes conocidos pero no es válida para descubrir nuevos.

La **secuenciación metagenómica** identifica todos los ADN de un entorno concreto, con independencia de su origen. Las secuencias se ensamblan y analizan en busca de nuevos genes similares a los de resistencia ya conocidos.

Las **selecciones metagenómicas funcionales** combinan los viejos métodos de cultivo con las nuevas técnicas que prescinden de este. Una bacteria anfitriona normalmente sensible a los antibióticos es modificada genéticamente para incorporar varios segmentos de ADN extraídos de la comunidad microbiana de interés. A continuación, los hospedadores modificados se exponen a los antibióticos: sobrevivirán aquellos que hayan adquirido el gen de resistencia. Por último, los microbios se analizan para conocer la secuencia que confiere resistencia.

Asimismo, nuestro grupo ha ideado una estrategia novedosa llamada **PARFuMS** (*Parallel Annotation and Reassembly of Functional Metagenomic Selections*), que integra selecciones metagenómicas funcionales sin cultivo, secuenciación de ADN de vanguardia, ensamblaje optimizado de secuencias con métodos bioinformáticos y algoritmos de notación para obtener el perfil de los resistomas.



El estudio de la resistencia a los antibióticos dependía sobre todo de métodos de cultivo bacteriano en el laboratorio, normalmente en placas de Petri (*derecha*). Hoy en día, tales métodos están dando paso a otros que permiten caracterizar el enorme porcentaje de bacterias (hasta el 99 por ciento) que no es posible aislar en cultivos puros.

HOSPITALES DONCASTER Y BASSETLAW/SCIENCE SOURCE

sin cultivo, secuenciación de ADN de vanguardia, ensamblaje optimizado de secuencias con medios bioinformáticos y algoritmos de anotación. Con este método, bautizado como PARFuMS (del inglés *Parallel Annotation and Reassembly of Functional Metagenomic Selections*), descubrimos que nueve genes de resistencia procedentes de suelos de Estados Unidos se hallaban presentes también en patógenos clínicos cosmopolitas, un sólido indicio de que las bacterias inofensivas del suelo y las bacterias patógenas humanas han intercambiado genes de sus resistomas en tiempos recientes.

A pesar de los últimos avances en el conocimiento de los resistomas edáficos, la exploración de este ecosistema extraordinariamente diverso no ha hecho más que comenzar. Se calcula que un solo gramo de suelo alberga cerca de mil millones de células bacterianas; ningún método actual puede ni de lejos escrutar tamaña diversidad. Alrededor de la mitad de los 60 filos conocidos del reino de las bacterias no se pueden cultivar en el laboratorio, y ni siquiera los cultivables se conocen en profundidad. Por suerte, los progresos en los métodos de experimentación y en los análisis bioinformáticos permiten explorar y secuenciar el ADN microbiano sin necesidad de recurrir al cultivo para completar los datos que faltan.

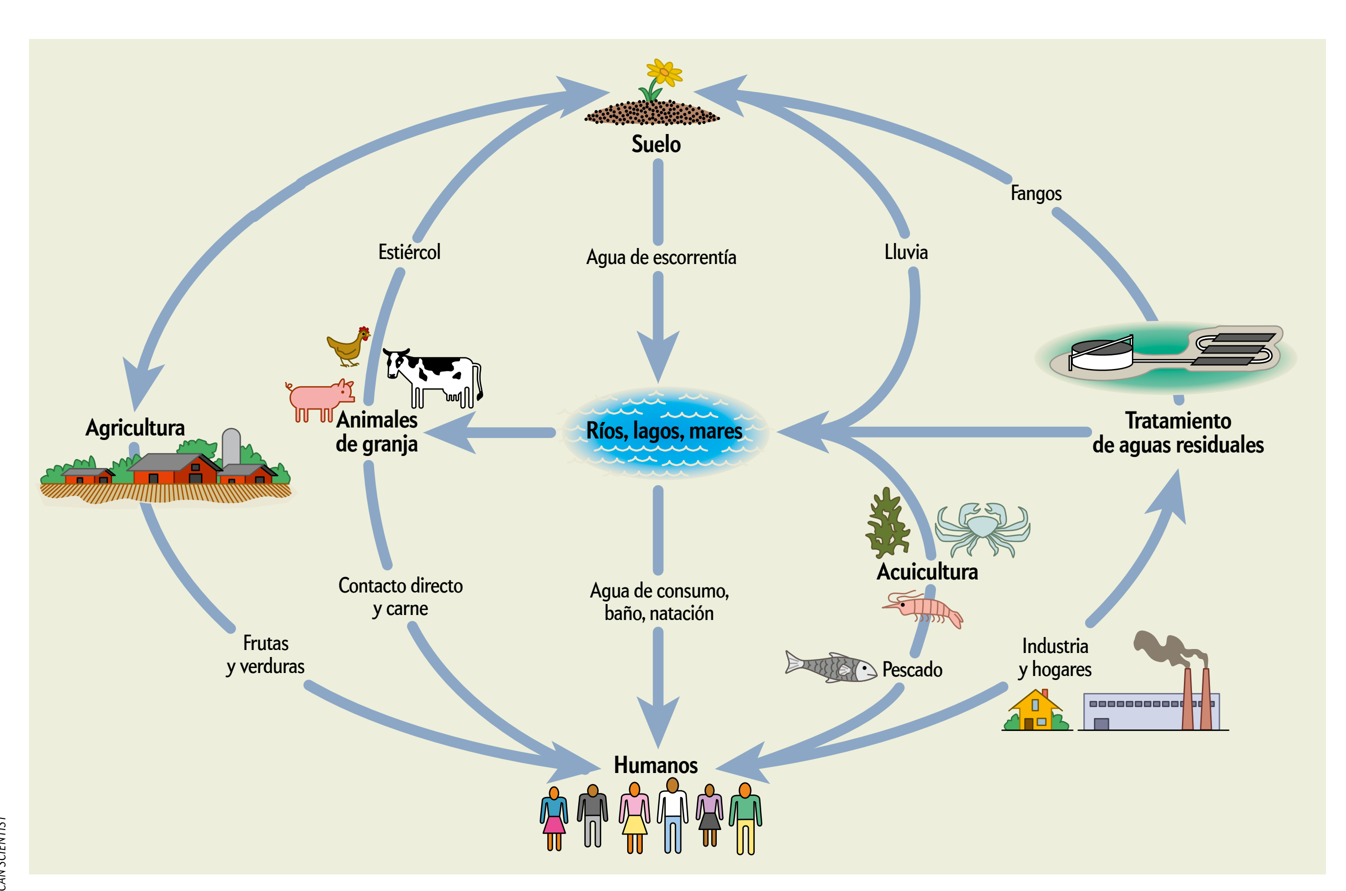
EL RESISTOMA HUMANO

Aunque el suelo es el principal reservorio de resistencia desde la perspectiva evolutiva, los microbios que colonizan nuestro organismo (la microbiota comensal humana) contienen el resistoma más accesible para los patógenos. Diez veces más numerosos que las propias células del cuerpo, su acervo génico (el microbioma) multiplica por cien el número de genes humanos [*véase* «El ecosistema microbiano humano», por J. Ackerman; Investigación y Ciencia, agosto de 2012]. Ecosistemas microbianos especializados y estables colonizan varias partes del cuerpo, con la comunidad más numerosa y diversa alojada en el intestino. La microbiota participa de uno u otro modo en casi todos los aspectos de la condición humana, en la salud y en la enfermedad.

Puesto que uno de los principales cometidos de esa comunidad es evitar que los patógenos invadan el intestino y que cualquier intruso interaccione antes con las células bacterianas que con las humanas, el resistoma comensal se halla a menudo en una buena posición para intercambiar genes de resistencia con los patógenos cercanos. La exposición creciente que ha sufrido la microbiota desde la aparición de los primeros antibióticos ha ejercido una amplia presión selectiva que ha mantenido un resistoma fuerte y diverso.

Las primeras observaciones del resistoma humano proceden de estudios en los que se cultivaron dichas bacterias. En los años noventa, Abigail Salyers, de la Universidad de Illinois, llevó a cabo experimentos con *Bacteroides*, normalmente mutualista pero en ocasiones patógeno, y demostró que ambas formas de la bacteria canjeaban entre sí genes de resistencia a las tetraciclinas y los macrólidos. El análisis de muestras conservadas de *Bacteroides* demostró, asimismo, que esos genes de resistencia habían aumentado sin tregua durante dos décadas.

Las conclusiones de dichos ensayos, esto es, que el empleo cada vez más profuso de los antibióticos está aumentando los



SIGMA XI/AMERICAN SCIENTIST

LAS RELACIONES ENTRE LAS PERSONAS, los animales y el ambiente facilitan el salto de las bacterias resistentes de un hospedador a otro. Una cepa resistente que habite en el suelo puede ser arrastrada por el agua de la lluvia y acabar colonizando a una persona que beba o se bañe en ella. Múltiples vías de intercambio impulsan la evolución y la propagación de la resistencia.

niveles de resistencia, han sido corroboradas por muchos otros estudios realizados con otros microbios comensales. Martin Blaser y sus colaboradores de la Universidad de Nueva York constataron el aumento de la resistencia a los macrólidos en *Enterococcus* comensales (un microorganismo vinculado a infecciones urinarias y meningitis) como efecto secundario de los tratamientos contra *Helicobacter pylori*, causante de algunas úlceras gástricas. También observaron que la mayor resistencia perduraba años después del final del tratamiento, lo que ponía en cuestión la idea tradicional de que la resistencia supone un alto coste para la bacteria beneficiosa, que sigue otros derroteros evolutivos o, en ausencia del antibiótico, acaba siendo desplazada por las cepas sensibles al mismo.

Esos resultados no solo se han observado en el ecosistema intestinal. *Staphylococcus epidermidis*, uno de los principales causantes de infecciones nosocomiales y con una resistencia persistente a los antibióticos, se ha hallado en los orificios nasales de pacientes tratados con estos fármacos. Numerosas investigaciones con modelos animales y humanos han demostrado que el resistoma comensal se intercambia con facilidad en el seno de los ecosistemas y entre ellos. Anette Hammerum y sus colaboradores, del Instituto Statens Serum de Dinamarca, han confirmado hace poco la transferencia entre humanos y cerdos de genes que permiten hacer frente a la vancomicina.

RESERVORIOS DE GENES

De los animales de granja a los humanos, y viceversa

Además de los microorganismos del suelo y del intestino humano, se cree que los microbios procedentes de la agricultura y la acuicultura contribuyen de manera decisiva al intercambio de genes de resistencia antibiótica. En Estados Unidos y Europa los antibióticos se utilizan cuatro veces más en la industria alimentaria que en la medicina humana. Frank Aarestrup, de la Universidad Politécnica de Dinamarca, ha demostrado que este consumo desenfrenado ha provocado altos niveles de resistencia en la microbiota intestinal de los animales de granja. Y los análisis genómicos computacionales del grupo de Eric Alm, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, han revelado que la transferencia de genes de resistencia entre la microbiota de los animales de granja y la humana es habitual. Además, el uso de los antibióticos en la acuicultura crece a un ritmo alarmante, en paralelo con el incremento de esta explotación a escala mundial. Felipe Cabello, de la Facultad de Medicina de Nueva York, y sus colaboradores han demostrado el aumento concurrente de la resistencia a los antibióticos en las bacterias del pescado criado en cautividad.

Los resistomas asociados a la agricultura y la acuicultura seguramente actúan como intermediarios entre los microorganismos comensales y patógenos humanos que viven en ambientes menos alterados, como el suelo, el mar o las aguas continentales. La transferencia de los genes de resistencia tal vez sea bidireccional. Las bacterias de los animales de granja se dispersan en el suelo con el estiércol, donde pueden propagar su resistencia a las bacterias edáficas. Y viceversa, los animales de granja suelen mantener contacto directo con el suelo, lo que posibilita la transferencia de los genes de la microbiota local a ellos. La localización de los focos de resistencia no es tarea fácil, pero está claro que el uso intensivo de antibióticos en la producción alimentaria está acelerando la evolución y la difusión de los genes que la confieren.



Más del 70 por ciento de los antibióticos vendidos en Estados Unidos se emplean para evitar que los cerdos, las vacas, las gallinas y otros animales de consumo contraigan enfermedades y favorecer así su crecimiento.

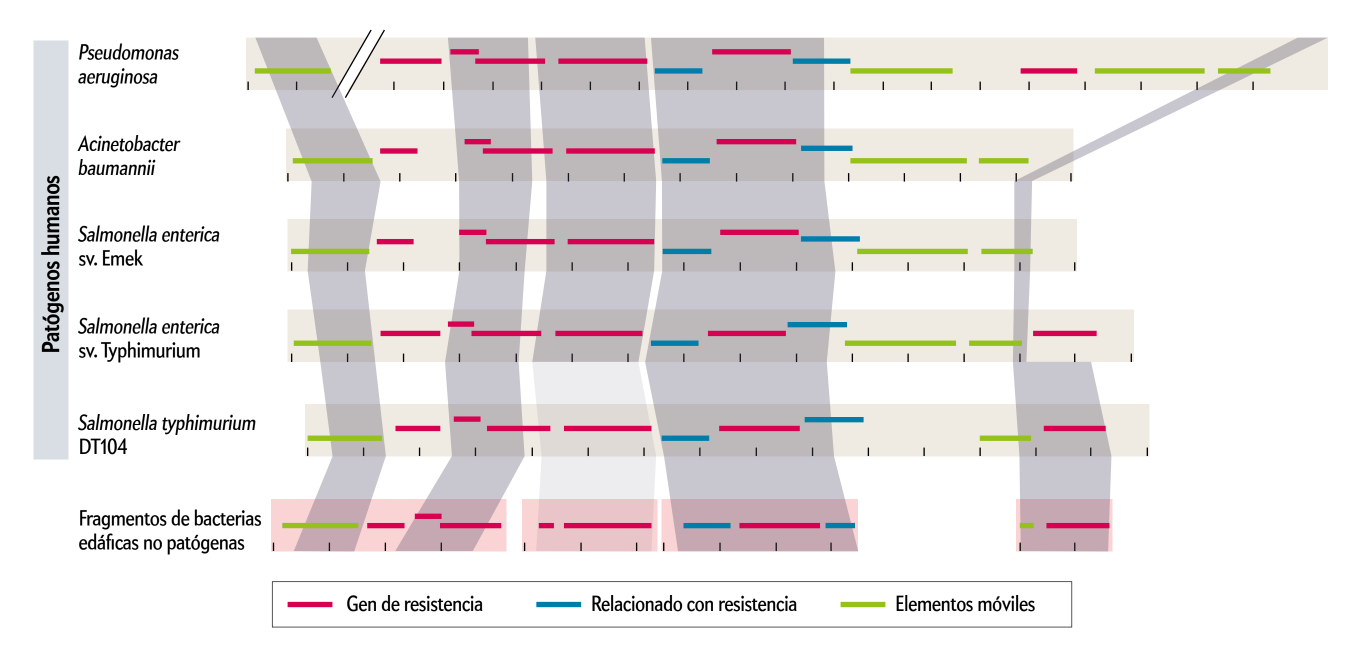
ARTERRA PICTURE LIBRARY/ALAMY

LA PUNTA DEL ICEBERG

Todas las pruebas presentadas indican que el tratamiento con antibióticos selecciona los genes de resistencia, que el aumento de esta puede perdurar durante años y que dichos genes se pueden intercambiar con los de la microbiota comensal y microbios foráneos. Como sucede con el suelo, nos estamos dando cuenta de que la imagen que poseemos del resistoma humano representa tan solo un pequeño retazo de la realidad, porque su medición se ha realizado con métodos basados en el cultivo.

En 2009 describimos la primera aplicación de selecciones metagenómicas funcionales sin cultivo en el estudio de los resistomas de la microbiota intestinal de dos personas sanas no emparentadas que no habían sido tratadas con antibióticos durante al menos un año. Partiendo de las muestras fecales de los voluntarios, caracterizamos los resistomas de las bacterias cultivables (resistoma cultivado) y los de todas las no cultivables (resistoma completo). La mayoría de los genes del resistoma cultivado figuraban en las bases de datos públicas de secuencias y eran idénticos a los genes de resistencia de patógenos corrientes, dato que confirmó el reciente intercambio entre las bacterias comensales y las patógenas.

En cambio, la mayor parte de los genes hallados en los resistomas completos eran desconocidos y guardaban una escasa similitud con los de las bases de datos. Los nuevos genes conferían al modelo patógeno empleado, *E. coli*, resistencia frente a varios antibióticos importantes, lo que ponía de manifiesto que ese reservorio génico inexplorado es funcional y no debe



LOS GENES DE RESISTENCIA A LOS ANTIBIÓTICOS de nueve cultivos de bacterias inocuas del suelo (*fila inferior*) resultaron idénticos (*sombreado gris*) a los genes de varios patógenos clínicos (*cinco filas superiores*). Ello demuestra el intercambio reciente entre los resistomas de las bacterias de ambos entornos.

ADAPTADO DE K. J. FORSBERG ET AL., *SCIENCE*, VOL. 337, PÁG. 1107; SIGMA XI/*AMERICAN SCIENTIST*

ser obviado si se quieren estudiar todos los intercambios del resistoma.

Un par de estudios sobre la diversidad microbiana indican que nuestros hallazgos describen solo una ínfima parte; será necesaria una indagación más profunda en muchas más personas para obtener una idea global del resistoma comensal humano. A inicios de año, los grupos de Peer Bork, del Laboratorio Europeo de Biología Molecular de Heidelberg, y Baoli Zhu, del Instituto de Microbiología de Pekín, estimaron por métodos computacionales los resistomas a partir de los datos de secuenciación de microbiomas intestinales de 207 y 162 personas, respectivamente, representativas de múltiples nacionalidades y culturas. Ambos equipos predijeron la existencia de miles de genes de resistencia en el microbioma analizado. La abundancia de tales genes concuerda con los datos acerca del uso de los antibióticos humanos y veterinarios, así como con la antigüedad de tales sustancias.

Pese a que comenzamos a vislumbrar la genética de esos ecosistemas complejos, necesitamos refinar las técnicas con y sin cultivo para conocer mejor los reservorios de resistencia antibiótica. Los estudios a largo plazo de grupos de personas con una microbiota sana o alterada nos permitirán obtener una imagen completa de los resistomas comensales. Siempre que es posible se recogen muestras apareadas de hábitats microbianos modificados por la actividad humana para cartografiar la ecología y la dinámica de intercambios de los resistomas.

Algunos estudios de los microbiomas a gran escala, como el Proyecto Microbioma de la Tierra y el Proyecto Microbioma Hospitalario, están catalogando las secuencias genómicas de microbiomas ambientales especializados y ofreciendo un marco para el cartografiado de las interacciones del resistoma.

La investigación de los resistomas en diversos hábitats microbianos, muchos no comentados aquí, ofrece múltiples utilidades. Existe el interés de la ciencia básica por conocer los principios que rigen la ecología, la evolución y la dinámica de la resistencia a los antibióticos, un conocimiento que contribuirá al objetivo fundamental de poner freno a la difusión de la multirresistencia y prolongar la vida útil de estos medicamentos. Pero ninguna caracterización del resistoma, por concienzuda que sea, acabará con las enfermedades infecciosas.

Necesitamos con apremio nuevos antibióticos, y tantos como sea posible. El mensaje más elocuente que emana de cada nuevo estudio del resistoma es que el acervo de genes y de mecanismos de resistencia a disposición de las bacterias es prácticamente ilimitado. Si queremos llevar la delantera, es preciso adoptar una estrategia en diversos frentes y buscar nuevos modos para mantener a raya a los patógenos sin cejar en la búsqueda de nuevas estratagemas. Tarde o temprano, las bacterias perjudiciales encontrarán en los enormes resistomas de sus incontables vecinos la fórmula para neutralizar hasta los medicamentos más eficaces.

PARA SABER MÁS

Heavy use of prophylactic antibiotics in aquaculture: A growing problem for human and animal health and for the environment. F. C. Cabello en *Environmental Microbiology*, vol. 8, págs. 1137-1144, 2006.
Bacteria subsisting on antibiotics. G. Dantas et al. en *Science*, vol. 320, págs. 100-103, 2008.
Functional characterization of the antibiotic resistance reservoir in the human microflora. M. O. A. Sommer, G. Dantas y G. M. Church en *Science*, vol. 325, págs. 1128-1131. 2009.
The shared antibiotic resistome of soil bacteria and human pathogens. K. J. Forsberg et al. en *Science*, vol. 337, págs. 1107-1111, 2012.
Use of collateral sensitivity networks to design drug cycling protocols that avoid resistance development. L. Imamovic y M. O. A. Sommer en *Science Translational Medicine*, vol. 5, págs. 204ra132, 2013.

EN NUESTRO ARCHIVO

La resistencia contra los antibióticos. S. B. Levy en *IyC*, mayo de 1998.
Desarrollo de resistencia contra los antibióticos. K. C. Nicolaou y C. N. Boddy en *IyC*, julio de 2001.
Mutación y resistencia a los antibióticos. F. Baquero, J. Blázquez y J. L. Martínez en *IyC*, diciembre de 2002.

EPIDEMIOLOGÍA

DETECTOR DE



Se están desarrollando aparatos para hospitales que identifican en poco tiempo casi cualquier bacteria, virus u hongo. Una red de estos dispositivos permitiría a las autoridades sanitarias salvar vidas, al detectar brotes de enfermedades con mayor prontitud que nunca

David J. Ecker

PATÓGENOS



David J. Ecker es científico e inventor en Ibis Biosciences, una empresa de Abbott.



Un día, mientras caminaba por un antiguo cementerio cerca de Filadelfia, me fijé en las fechas de nacimiento y defunción tallados en las lápidas. Recordé entonces que hasta principios del siglo xx la mayoría de las personas morían antes de cumplir los cincuenta años. El principal motivo de estos fallecimientos era una enfermedad infecciosa, como la viruela, la gripe o la neumonía.

Hoy en día, las enfermedades contagiosas constituyen una causa poco frecuente de muerte en los países desarrollados, gracias a las mejoras en el saneamiento, la nutrición y las vacunas, así como a la introducción de los antibióticos. Sin embargo, nos estamos acercando de nuevo a una era de muertes prematuras por estas dolencias, porque muchos microorganismos se están volviendo resistentes a los medicamentos y la industria farmacéutica no está desarrollando suficientes compuestos que los sustituyan.

La excesiva prescripción de antibióticos es uno de los principales factores que contribuyen a este problema y se produce por motivos comprensibles. Las herramientas diagnósticas actuales no suelen determinar de forma rápida cuál de las numerosas bacterias posibles (los únicos organismos vulnerables a los antibióticos) está causando la enfermedad. En la mayoría de los casos, se requieren métodos de cultivo anticuados que necesitan varios días para identificar las cepas bacterianas específicas. Retrasar el tratamiento puede resultar mortal, por lo que los médicos intentan cubrir todas las opciones recetando antibióticos de amplio espectro (los que terminan con muchos tipos de microorganismos). Sin embargo, a veces los fármacos matan las bacterias vulnerables, pero no afectan a algunas que se muestran resistentes a ellos. Los microorganismos se multiplican sin el control de sus competidores y se propagan a otras personas sin provocarles síntomas, hasta que encuentran las condiciones adecuadas para hacer enfermar a alguna. Tales prácticas terapéuticas ayudan hoy a salvaguardar la salud de numerosos pacientes, pero en el futuro darán lugar de forma inevitable a nuevas bacterias resistentes.

Las soluciones a esta paradoja pueden hallarse al alcance de la mano. Se están desarrollando nuevos biosensores moleculares que permitirán determinar en poco tiempo si una persona está sufriendo una infección bacteriana o de otro tipo y cuál es la especie responsable. Una característica clave de estos dispositivos es que podrán analizar casi todos los patógenos de una sola vez, en lugar de tenerlos que examinar de uno en uno. Además, los médicos que sospechen la implicación de alguna bacteria no deberán realizar suposiciones sobre su identidad. Nuestras investigaciones en Ibis Biosciences, que en estos momentos forma parte de Abbott, proporcionan la base para el desarrollo de uno de estos dispositivos. Otros ingenieros están compitiendo para concebir productos similares en otras empresas.

Estos instrumentos de diagnóstico rápido se hallan hoy en el camino que les llevará a los hospitales y clínicas en los próximos años. Sin embargo, con un poco de previsión y planificación, podemos aumentar en gran medida su provecho. Al unirlos en una red nacional o incluso mundial de dispositivos interconectados, podrían proporcionar el primer sistema de amplio espectro, en tiempo real y de alerta temprana para detectar brotes de enfermedades nuevas, toxinfecciones alimentarias, pandemias mundiales y, tal vez, ataques bioterroristas.

MOMENTO PARA RENOVARSE

Los métodos actuales para el diagnóstico de las enfermedades infecciosas están basados en técnicas de cultivo que datan de hace más de 150 años, de los tiempos de Louis Pasteur. Los médicos recogen una muestra de tejido del paciente (sangre, moco, orina) y la transfieren a un frasco de cultivo rico en nutrientes o a una placa que contiene agar (un extracto gelatinoso de algas marinas). Pasados uno o dos días, los microorganismos se habrán multiplicado de tal modo que los técnicos de laboratorio podrán identificarlos. Observar el modo y la velocidad con que estos cultivos dejan de crecer o mueren en presencia de diversos fármacos proporciona también una idea de su sensibilidad a dichas sustancias. Pero aunque se lograra agilizar este proceso, seguiría sin ser ideal para tomar decisiones sobre el tratamiento, debido a la dificultad que entraña el cultivo de numerosos patógenos (como los que necesitan medios o condiciones de crecimiento especiales). Otras veces resulta imposible hacer crecer las bacterias, puesto que la muestra se ha obtenido de un paciente que ha estado tomando antibióticos.

EN SÍNTESIS

Se están desarrollando nuevos biosensores que permiten identificar el origen vírico, bacteriano o fúngico de una enfermedad o infección en el plazo de unas pocas horas después de analizar una muestra de un paciente.

Con ellos, las personas recibirían el tratamiento correcto más pronto y los médicos recetarían antibióticos solo cuando fuesen realmente necesarios.

Con solo conectar 200 de estos dispositivos en una red, EE.UU. podría obtener alertas tempranas de epidemias emergentes o de ataques bioterroristas.

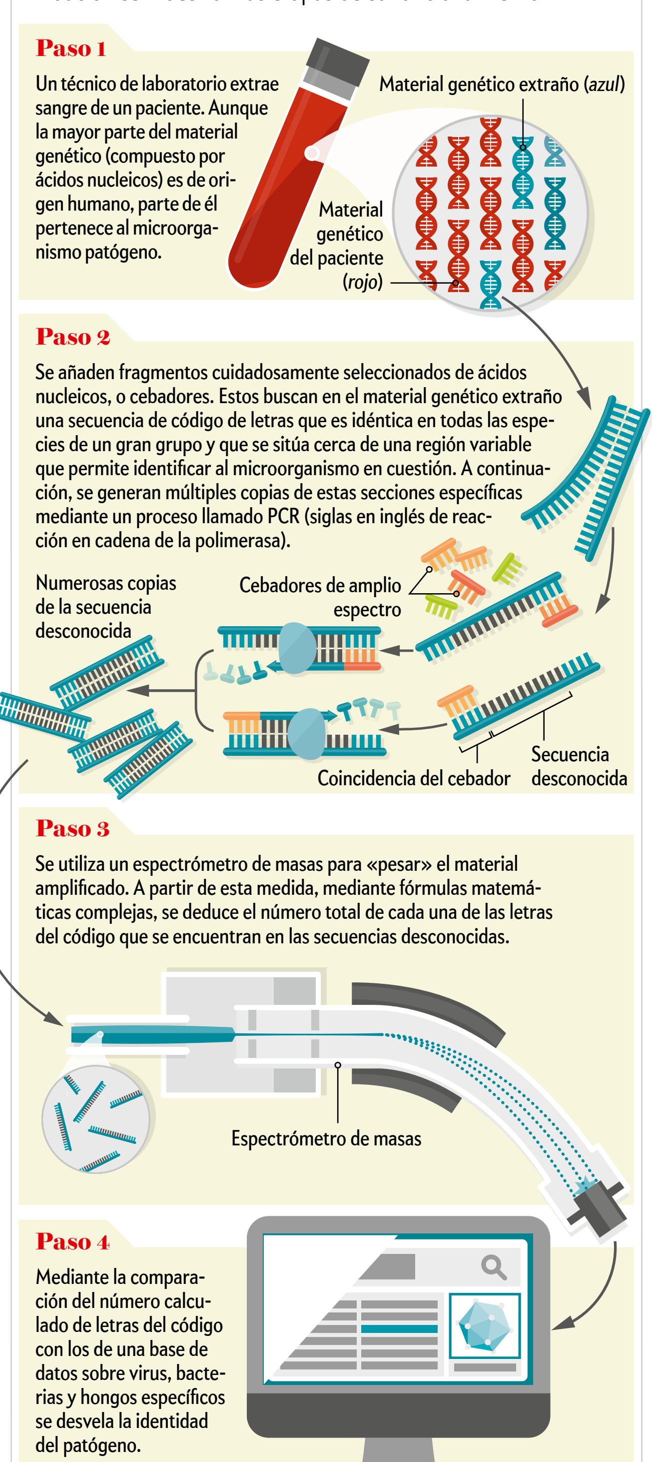
Los principales obstáculos para crear una red de ese tipo son principalmente políticos y normativos, no técnicos.

PÁGINAS ANTERIORES: I LOVE DUST

ASÍ FUNCIONA

Biosensor instantáneo

Se están desarrollando dispositivos sofisticados que emplean una combinación de técnicas biológicas, físicas y matemáticas para identificar cualquiera de los más de mil patógenos que causan enfermedades humanas. Una red con tales biosensores distribuidos a lo largo de un país o región podría proporcionar alertas tempranas de epidemias o ataques biológicos e identificar los tratamientos más eficaces. A continuación se muestran las etapas de su funcionamiento.



LUCY READING-IKKANDA

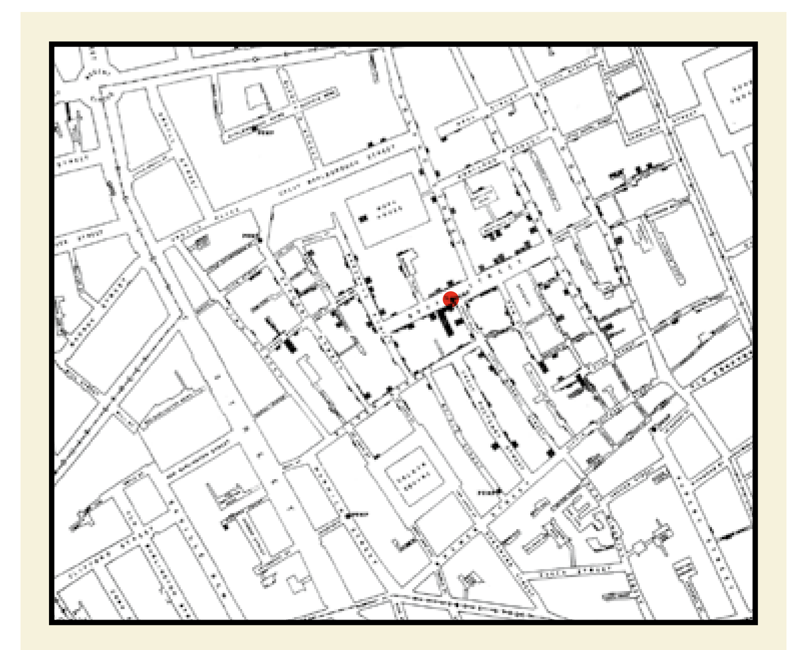
Me interesé por primera vez en el problema del diagnóstico y seguimiento de las enfermedades infecciosas cuando trabajaba para la Agencia de Proyectos Avanzados del Departamento de Defensa estadounidense en nuevas estrategias para descubrir antibióticos. Nuestro objetivo consistía en identificar, entre miles de compuestos, unos pocos que afectasen a numerosos tipos de bacterias, al unirse a cierta secuencia de ARN (una molécula central en el funcionamiento de las células) que todas tenían en común.

Mi equipo utilizó unos aparatos denominados espectrómetros de masas para determinar si los posibles fármacos se habían fijado al ARN bacteriano. Simplificando, los espectrómetros de masas son básculas que pesan las moléculas de forma muy precisa. Puesto que conocíamos el peso del ARN bacteriano en cuestión, podíamos deducir el de cualquier compuesto que se hubiese pegado a él del mismo modo que pesaríamos un perro: sosteniéndolo en brazos de pie sobre una báscula de baño y luego restando de esa cifra nuestro propio peso. A su vez, conocer ese valor del compuesto nos informaba sobre su identidad, ya que cada compuesto poseía una masa distinta.

Pronto nos dimos cuenta de que tal técnica nos permitiría distinguir entre bacterias, virus, hongos y parásitos si obteníamos el peso de una parte de su ARN o ADN. Cada hebra de estas moléculas está formada por subunidades, o nucleótidos, a los que se conoce por las bases nitrogenadas que los componen: las letras *A* (adenina), *C* (citosina), *G* (guanina) y, o bien *U* (uracilo) en el caso del ARN, o bien *T* (timina) en el caso del ADN. Casi por definición, algunas partes de estos ácidos nucleicos resultarán únicas en los distintos patógenos. Debido a que los pesos moleculares de los nucleótidos (A, T, C, G y U) difieren de uno a otro, podemos determinar el número de cada nucleótido presente en una hebra según la lectura proporcionada por el espectrómetro de masas. Así, una hebra de ADN que pese 38.765,05 dáltons (la unidad estándar de la medida atómica) debe contener 43 unidades de adenina, 28 de guanina, 19 de citosina y 35 de timina. Tal combinación es la única que arroja ese resultado sin tener que recurrir a fracciones de un nucleótido, que no existen en la naturaleza. A su vez, esta información nos indica la especie de microorganismo presente en la muestra.

El método es similar al que emplearíamos para deducir el número de monedas que contiene un frasco con monedas de 25 centavos (que pesan 5,670 gramos cada una) y de cinco centavos (que pesan 5,000 gramos). Si el conjunto de monedas pesa 64,69 gramos, por fuerza estará formado por siete monedas de 25 centavos y cinco de cinco centavos ($64,69 = 5,67q + 5n$, donde q y n solo pueden ser números enteros). Para cualquier otro número de las monedas grandes se debería recurrir a fracciones de las pequeñas.

Para identificar los patógenos en una muestra, se necesita distinguir el ADN o ARN del microorganismo de los propios del paciente. Normalmente, la cantidad de ácidos nucleicos microbianos resulta demasiado escasa como para poder medirla, a menos que se obtengan copias adicionales. En lugar de esperar a que crezca un número suficiente de microbios en el cultivo, utilizamos una técnica llamada PCR (por las siglas en inglés de reacción en cadena de la polimerasa), que permite hacer copias, o amplificar, el ADN o el ARN presente en la muestra. La PCR se ha usado durante mucho tiempo para detectar patógenos, pero se ha limitado a identificar uno o unos pocos de ellos cada vez. Junto con mis colaboradores, decidimos emplear la PCR de modo que, al acoplarla a la espectrometría de masas, pudiésemos describir grupos muy amplios de microorganismos al mismo tiempo.



AL ELABORAR UN MAPA DE LOS CASOS DE CÓLERA (*sombreado negro*) **en Londres en 1854, el médico John Snow determinó el origen de la enfermedad: una bomba de suministro de agua comunitaria contaminada con heces (*marca roja añadida*). Hoy en día se obtienen mapas similares para identificar la procedencia de los brotes o de los ataques bioterroristas. La red de sensores de patógenos propuesta por el autor revelaría su origen de forma mucho más rápida y sencilla de lo que es posible en la actualidad.**

La clave consiste en limitar la cantidad de ácido nucleico que debemos generar para obtener resultados concluyentes. Logramos ese objetivo siendo muy selectivos con los segmentos de ADN o ARN que amplificamos. Nos aseguramos de escoger fragmentos que contengan secuencias de letras que son idénticas en grupos amplios de microorganismos (como los grampositivos frente a los gramnegativos) y que a la vez se sitúan al lado de regiones distintivas de una especie en particular, como *Staphylococcus aureus*. Al centrarnos en múltiples secuencias cuidadosamente seleccionadas, podemos identificar categorías y subcategorías concretas de organismos sin tener que alargar el proceso de forma innecesaria. Así pues, tras extraer el ARN o el ADN microbiano, añadimos a la muestra los cebadores (fragmentos cortos de ADN que imitan el mecanismo natural de las células para iniciar el proceso de copia de los nucleótidos), los cuales seleccionan a continuación los segmentos deseados para su procesamiento posterior. Una vez terminada esta fase, medimos los segmentos resultantes en el espectrómetro de masas. Este nos da una serie característica de números que podemos cruzar con una base de datos principal obtenida a partir de más de 1000 microorganismos causantes de enfermedades humanas.

El conjunto del *hardware* y el *software* constituye un detector universal que, en solo unas horas, reconoce el tipo y algunas de las características singulares del patógeno que está enfermando a una persona.

Un prototipo de la máquina que ayudamos a crear se puso a prueba en una situación real en 2009, cuando se identificaron, en dos ubicaciones del sur de California, una niña de nueve años y un niño de diez años, ambos con síntomas seudogripales. Los médicos obtuvieron un frotis de sus gargantas y sometieron las muestras a las pruebas rápidas estándar para la gripe. Los resultados sugerían que el virus de la gripe era el causante de la enfermedad, pero no pudieron indicar cuál de las cepas conocidas se hallaba implicada.

Las muestras se enviaron al Centro Naval de Investigación Sanitaria de San Diego, que estaba llevando a cabo numerosos ensayos con el prototipo. El dispositivo determinó que los dos niños estaban infectados por una misma cepa vírica que no se había descrito antes. También señaló que el virus se había originado hacía poco en los cerdos, puesto que el recuento de letras del ARN encajaba sobre todo con las cepas de la gripe porcina de la base de datos. Además, el recuento de letras, o huella genética, de estos dos casos coincidió con muestras posteriores de lo que pronto se denominó el virus de la gripe porcina, hoy conocido como el virus pandémico de 2009 (H1N1). Nadie puede decir si la alerta temprana salvó alguna vida, pero ciertamente no hizo ningún daño, y disponer de una técnica que pudiera reconocer una cepa vírica reciente y única resultaría indudablemente de gran ayuda en la identificación de nuevos brotes.

Igual que permitió detectar con rapidez el virus de la gripe en 2009, se espera que los detectores universales de patógenos ofrezcan todo su potencial en situaciones en las que los médicos carecen de pistas acerca de lo que hace enfermar a sus pacientes. Los dispositivos también pueden ayudar en la selección de los fármacos. En concreto, el mismo perfil de espectrometría de masas que revela la cepa bacteriana proporciona información sobre su vulnerabilidad a varios antibióticos, lo que permite recetar los medicamentos correctos de forma inmediata y solo cuando son necesarios. Los pacientes deberían beneficiarse de un tiempo de recuperación más corto, incluso para cepas resistentes, puesto que reciben antes el tratamiento óptimo.

MÁS ALLÁ DE LOS INDIVIDUOS

Además de las ventajas para los pacientes, la técnica conllevará también beneficios sociales. Los médicos podrán determinar en poco tiempo si varias personas de una zona se han infectado con el mismo organismo, por ejemplo con *Salmonella*, una causa habitual de intoxicación alimentaria. Cuando los especialistas en salud pública disponen de esta información, realizan una investigación epidemiológica a la antigua usanza, con entrevistas a los pacientes y el seguimiento de sus movimientos recientes para determinar si todos ellos presentan algún rasgo en común, como haber frecuentado cierto restaurante o comido el mismo ingrediente de una ensalada. Los resultados de tales investigaciones, que siguen el mismo formato básico que el utilizado por John Snow en 1854 para averiguar que el origen de una epidemia de cólera en Londres se hallaba en una bomba de agua comunitaria, pueden necesitar semanas o meses para completarse. Ello explica por qué solo se investigan o se resuelven los brotes más importantes.

No obstante, existe un método más eficaz y tal vez la clave se encuentre en nuestro bolsillo o bolso. Hoy en día, la mayoría de las personas llevan consigo un teléfono móvil, el cual posee datos de geolocalización como parte de su *software* de funcionamiento o en una de las aplicaciones auxiliares. Además, los proveedores de servicios recopilan todo tipo de información sobre la comunicación del teléfono con la torre, con la que puede



triangularse el paradero de una persona en un momento dado. Si los infectados con un organismo relevante para la salud pública aceptasen compartir los datos del móvil sobre sus desplazamientos recientes, los epidemiólogos podrían determinar con rapidez si varios de ellos habían visitado la misma ubicación en un plazo de tiempo específico.

El mismo derecho a la privacidad que debe respetarse en las investigaciones epidemiológicas actuales debería preservarse también en un sistema basado en la telefonía móvil. La mayor diferencia estribaría en que se podría reaccionar mucho antes. Coordinados de forma adecuada, los datos de una red bien diseñada de detectores universales de patógenos harían algo más que identificar de inmediato las amenazas para la salud pública, como un brote epidémico, un ataque bioterrorista o una contaminación alimentaria potencialmente mortal. Los expertos conocerían también dónde se ha originado una infección y si esta se restringe a una sola ciudad o se ha propagado a otras. Los resultados podrían comunicarse de inmediato a los pacientes o a las autoridades sanitarias, y los médicos podrían acelerar el intercambio de información sobre los tratamientos eficaces.

La construcción de una red de ese tipo llevaría el diagnóstico médico y la epidemiología del siglo XIX de lleno al siglo XXI.

LA EXTENSIÓN DE LA RED

Debido a que la propagación de una infección puede representarse como una red social, podemos deducir cuántos detectores de patógenos deberían conectarse entre sí en un país o región para que todo funcionase como un sistema de alerta temprana. Una de las formas más sencillas de enfocar el problema consiste en emplear un modelo matemático llamado simulación de Montecarlo, en el que un ordenador ejecuta el mismo escenario bajo múltiples condiciones para determinar el abanico de posibles resultados. (Las empresas de inversión utilizan cálculos similares en todo momento para estimar el tamaño de los ahorros de una persona en la jubilación, bajo diversas situaciones de mercado.) Con los datos epidemiológicos nacionales sobre las tasas de infección, sobre cómo y dónde las personas buscan atención sanitaria y con qué frecuencia se piden pruebas diagnósticas, además de los tiempos de incubación de una amplia gama de patógenos, mi equipo ejecutó el programa miles de veces para calcular el tamaño mínimo en el que la red alertaría de un brote de interés para la salud pública.

Los resultados fueron notables. La interconexión de 200 hospitales del país cuidadosamente seleccionados bastaría para cubrir toda la población metropolitana de los EE.UU. Cada zona urbana del tamaño de Washington, D.C. o San Diego necesitaría unos cinco hospitales con biosensores universales conectados a la red. Solo con que siete pacientes acudiesen a un servicio de urgencias, habría un 95 por ciento de probabilidades de detectar de inmediato un agente infeccioso relevante, como la gripe aviar, el ántrax, la peste o un patógeno transmitido por los alimentos.

Este número inesperadamente bajo de máquinas interconectadas, o nodos, es consecuencia de un fenómeno al que hemos denominado «efecto de embudo». La mayoría de los pacientes permanecen en casa para cuidarse ellos mismos. Pero los más enfermos acuden a un hospital (el primer embudo), donde los médicos cualificados decidirán cuáles de ellos necesitan someterse a la prueba (el segundo embudo). En otras palabras, no tenemos que colocar biosensores donde se halla la gente (lo cual exigiría un mayor número de dispositivos), sino que ya habrá suficientes personas «adecuadas» que llegarán a los biosensores.

Cuando realizamos las simulaciones informáticas de las enfermedades infecciosas más importantes para la salud pública y comparamos la eficacia de la red en identificar nuevos brotes con los mejores resultados del sistema actual, la red se mostró muy superior. Detectó la primera línea del brote entre varios días y semanas antes que el sistema actual. En una situación real, tal anticipación podría significar la diferencia entre la vida y la muerte para miles de personas, puesto que hay más tiempo para que los hospitales preparen la acogida de pacientes, las autoridades sanitarias liberen las existencias de medicamentos o los investigadores determinen el origen de un ataque malévolo.

¿Y AHORA QUÉ?

Según nuestros cálculos, costaría unos 40 millones de dólares establecer una red de 200 hospitales (suponiendo que estos compren sus propios biosensores) y luego, unos 15 millones de dólares al año mantener la red. En comparación, un estudio de 2012 sobre las 14 causas más frecuentes de intoxicaciones alimentarias graves calculó los costes directos del tratamiento y ausencias laborales en 14.000 millones de dólares al año. Probablemente, en los EE.UU. convendría que ejecutasen la red los Centros para el Control y la Prevención de las Enfermedades, dada su experiencia y misión actuales en el seguimiento de los brotes.

Nadie ha desarrollado todavía un sistema de vigilancia epidemiológica tan sofisticado como el que proponemos. Teniendo en cuenta la experiencia anterior, quizás el diseño del *hardware* y del *software* represente la parte más sencilla. También deben abordarse numerosas cuestiones normativas, legales y territoriales. Pero el mayor obstáculo es que ninguna parte interesada tiene el mandato, el incentivo o la oportunidad de lanzar tal empresa, a pesar de que beneficiaría a todo el mundo. El nivel de cooperación necesario por parte de médicos, enfermeros, administradores de los hospitales, expertos en salud pública y defensores de la privacidad puede costar en alcanzarse en países con sistemas de atención sanitaria descentralizados y mayoritariamente privados.

Una estrategia para el diagnóstico de las enfermedades infecciosas integrada en toda la sociedad resultará más eficaz y menos cara que el enfoque actual de la salud pública y de contramedidas médicas para la detección de los agentes pandémicos y amenazas biológicas. La vigilancia de la salud pública en tiempo real basada en las nuevas técnicas diagnósticas y los modernos sistemas de comunicación y redes encierra un enorme potencial. Mejoraría la atención de los pacientes, reduciría el uso de antibióticos y proporcionaría alertas para la contención temprana de brotes o ataques terroristas. Queda por ver si tenemos la capacidad de unir nuestros esfuerzos para producir un sistema de vigilancia sanitaria más inteligente.

PARA SABER MÁS

The universal biosensor. Gary Stix en *Scientific American*, págs. 20-21, noviembre de 2002.

Ibis T5000: A universal biosensor approach for microbiology. David J. Ecker et al. en *Nature Reviews Microbiology*, vol. 6, págs. 553-558, julio de 2008.

Comprehensive biothreat cluster identification by PCR/electrospray-ionization mass spectrometry. Rangarajan Sampath et al. en *PLOS ONE*, vol. 7, n.º 6, art. n.º e36528, 29 de junio de 2012.

«Salvage microbiology»: Detection of bacteria directly from clinical specimens following initiation of antimicrobial treatment. John J. Farrell et al. en *PLOS ONE*, vol. 8, n.º 6, art. n.º e66349, 25 de junio de 2013.

por Margarita Metallinou, Fèlix Amat y Salvador Carranza

Amantes del desierto

Los reptiles de las dunas de Arabia han desarrollado varias adaptaciones para sobrevivir en este medio tan hostil

En el corazón de la península arábiga, los grandes desiertos, con las dunas más largas y altas del mundo, constituyen uno de los ambientes más adversos del planeta. Entre sus principales características destacan la escasez de lluvia (inferior a 25 milímetros al año en algunas zonas), una elevada evaporación y temperaturas muy altas durante el día. A pesar de esas condiciones extremas, un grupo de animales, los reptiles, han conquistado con éxito este ambiente. En la actualidad existen más de 18 especies de reptiles endémicas de los desiertos de Arabia. Las fotografías corresponden a los desiertos de Rub al-Jali y al-Sharqiyah, en Omán.

La clave para sobrevivir en este medio radica en las diferentes adaptaciones que presentan los organismos. Con temperaturas diurnas a menudo superiores a los 45 ºC, muchos animales son nocturnos. Durante el día, las plantas les proporcionan refugio; en otras ocasiones, se entierran en la fina arena para protegerse del sol.

Los gecos del género *Stenodactylus* son uno de los grupos más abundantes, con numerosas especializaciones para la vida en el desierto. Pero quizás unos de los mejor adaptados son los reptiles del género *Scincus*, también conocidos como peces de arena, por la facilidad con la que se entierran y se mueven por debajo de ella. Sin embargo, no todos los reptiles huyen del sol. Los dos agámidos del género *Phrynocephalus* pueden aguantar largas horas bajo el intenso sol de la mañana. Ello les permite estar activos durante las horas centrales del día y evitar la competencia con otras especies. Algunos alcanzan temperaturas internas superiores a los 43 ºC, muy por encima de los límites fisiológicos de cualquier mamífero. Para evitar el sobrecalentamiento excesivo adoptan diversos comportamientos, como situarse paralelos a los rayos del sol y reducir al mínimo el contacto del cuerpo con la ardiente arena.

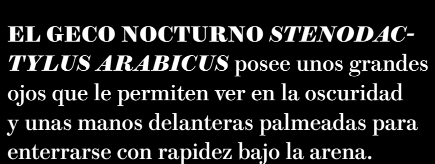
Algunos de los depredadores más peligrosos también se las han ingeniado para sobrevivir en las dunas y sacar el máximo partido de ellas. Para atraer a sus presas, la víbora *Cerastes gasperettii* entierra su cuerpo y solo deja al descubierto el extremo de la cola, que mueve como si fuese un gusano. Además, mediante ondulaciones laterales, avanza a gran velocidad con un bajo coste energético. La boa *Eryx jayakari* pasa la mayor parte del tiempo enterrada y se mueve dentro de la arena con gran agilidad y velocidad. Tiene los ojos en la parte superior de la cabeza, lo que le permite permanecer oculta al acecho de presas, como roedores y pequeños reptiles.

—Margarita Metallinou y Salvador Carranza
Instituto de Biología Evolutiva
CSIC-Universidad Pompeu Fabra, Barcelona
—Fèlix Amat
Área de Herpetología
Museo de Ciencias Naturales de Granollers (Barcelona)



EL REPTIL AMANTE DEL SOL POR EXCELENCIA, *Phrynocephalus arabicus*, adopta aquí su típica postura para evitar el intenso calor que irradia la arena.





EL GECO NOCTURNO *STENODACTYLUS ARABICUS* posee unos grandes ojos que le permiten ver en la oscuridad y unas manos delanteras palmeadas para enterrarse con rapidez bajo la arena.



SCINCUS MITRANUS está adaptado a una vida casi exclusivamente subterránea. Su morro en forma de cuña le ayuda a desplazarse bajo la arena y una escama que cubre el pabellón auditivo impide la entrada de arena en el oído.

JIRI SMID (*Phrynocephalus*); ROBERTO SINDACO (*Stenodactylus*); FÉLIX AMAT (*Scincus y Eryx*)



LA BOA *ERYX JAYAKARI* tiene los ojos en la parte superior de la cabeza. Ello le permite permanecer enterrada mientras caza.

por Naomi Oreskes



Naomi Oreskes es profesora de historia de la ciencia en la Universidad Harvard.

El encaje de las placas tectónicas

El desarrollo de la teoría de la deriva continental muestra la importancia del consenso para los científicos

El geofísico alemán Alfred Wegener propuso en 1912 la teoría de la deriva continental. Los paleontólogos sospechaban ya que los continentes habían estado unidos en el pasado, debido a las similitudes entre fósiles y estratos geológicos. Los geólogos sabían también que las rocas alpinas se habían desplazado cientos de kilómetros durante la orogenia.

Con todo, la teoría de la deriva continental no halló aceptación general hasta los años sesenta. La investigación geofísica recibió un fuerte impulso durante la Guerra Fría, hasta llegar a generar la prueba que zanjó el debate. Particularmente influyente resultó el trabajo publicado en *Nature* por los geólogos británicos Frederick Vine y Drummond Matthews en 1963. En él se interpretaban las bandas de magnetización alterna del fondo marino como prueba del movimiento de separación de los continentes. La aceptación del movimiento de la corteza culminó en la teoría de la tectónica de placas.

La historia del encaje de las placas tectónicas nos ayuda a entender el debate actual sobre el cambio climático. Las controversias en la frontera de la investigación científica atraen nuestra atención, pero a la hora de tomar decisiones, es esencial atender al conocimiento estable y consensuado.

La convección del manto

Recordamos a Wegener porque su solución se acerca a la que aceptamos hoy, y porque nuestra cultura individualista se nutre de héroes y momentos singulares. Pero no fue el único que intentó explicar las similitudes entre fósiles y estratos geológicos. El geólogo sudafricano Alexander du Toit y el británico Arthur Holmes desarrollaron, asimismo, teorías sobre la movilidad de la corteza terrestre a escala continental.

Du Toit expuso sus ideas en *Our wandering continents* (Oliver and Boyd, 1937). Holmes, junto con el geoquímico irlandés John Joly, sugirió que el movimiento de la corteza se debía al calor emanado por la radiactividad, la disipación del cual creaba corrientes de convección en el manto que impulsaban la deriva continental. Numerosos geólogos en ciernes conocieron estas ideas a través del manual de Holmes *Principles of physical geology* (Thomas Nelson & Sons, 1944).

El geodesta holandés Felix Vening Meinesz aportó nuevas mediciones en los años treinta del siglo xx, realizadas en el archipiélago indonesio y en el Caribe, junto a los geólogos Harry Hess y Maurice Ewing. Meinesz comprobó que el campo magnético terrestre era más débil de lo normal sobre las regiones más profundas del océano. Su explicación fue que las corrientes de convección hundían en el manto las rocas de menor densidad de la corteza.

Hess, que luchó en el Pacífico durante la Segunda Guerra Mundial, no retomó la investigación en tectónica inmediatamente tras la guerra, pero otros sí lo hicieron. Un equipo de geofísicos, liderado por los británicos P. M. S. Blackett y Keith Runcorn, y que investigaba el origen del campo magnético terrestre, descubrió cambios en la polaridad de minerales correspondientes a distintos momentos de la historia geológica, que sugerían cambios en la posición de los polos. Este descubrimiento llamó la atención de Hess, que se dio cuenta de que estos cambios de polaridad podían explicarse por los movimientos de los continentes.

En 1960, el buque de investigación estadounidense *Explorer* usó un magnetómetro para medir el campo en el fondo marino.

C&GS SEASON'S REPORT JONES 1960-2/NOAA

La expansión de los océanos

Hess sugirió que las corrientes ascendentes de convección del manto separaban el fondo marino, empujando los continentes en sentidos opuestos. Si bien la expansión del suelo oceánico daba cuenta de las observaciones geológicas y geofísicas, no obtuvo un reconocimiento inmediato. Había que recabar más datos geomagnéticos.

Blackett, socialista contrario a la proliferación nuclear, se dedicó al geomagnetismo después de la guerra para evitar la investigación militar. Sin embargo, la exploración geofísica del fondo marino era también de interés militar en la era atómica, porque afectaba a la guerra submarina. A finales de los cincuenta se produjo el descubrimiento sor-

prendente de las bandas magnéticas del fondo marino. Los oceanógrafos que las detectaron, Ronald Mason y Arthur Raff, no sabían cómo explicarlas, pero otros lo hicieron pronto. Vine y Matthews, así como el geofísico canadiense Lawrence Morley, tuvieron independientemente la misma idea. Las bandas magnéticas eran consecuencia de la expansión del suelo oceánico: las rocas formadas en las dorsales oceánicas registraban el campo magnético terrestre y su polaridad se alternaba periódicamente siguiendo los cambios de polaridad del campo.

No era lo mismo decir que los océanos de separaban que relacionar esta expansión con el movimiento global de la corteza. Más de una docena de científicos, incluidas mujeres como Tanya Atwater y Marie Tharp, crearon la teoría de la tectónica de placas tal como la conocemos, que explica la deriva continental, los volcanes, los seísmos y el flujo térmico alrededor del globo. En 1965, el geólogo canadiense Tuzo Wilson propuso que las fallas transformantes se formaban por la acomodación del suelo marino alrededor de las dorsales oceánicas, una idea confirmada por el sismólogo estadounidense Lynn Sykes. Otros sismólogos mostraron que, en las fosas oceánicas, fragmentos de corteza se hundían en el manto, lo que llevó a los geofísicos a estudiar la relación entre el movimiento de estas placas corticales y la geología continental.

El trabajo de Vine y Matthews forma parte del desarrollo de las ciencias de la Tierra en el siglo xx, propiciado por los avances técnicos y al apoyo gubernamental después de la Segunda Guerra Mundial. Casi todos los datos geofísicos marinos y sísmicos fueron recolectados con financiación militar porque eran relevantes para la Guerra Fría.

Ese período imprimió a la ciencia un nuevo carácter. La investigación actual es costosa y requiere el apoyo de los Gobiernos; además, los logros científicos son fruto del trabajo colectivo de grandes equipos. Esta prosaica realidad nos recuerda que el poder de la ciencia radica en el esfuerzo colectivo y el consenso de la comunidad científica, por más que celebremos las hazañas de genios individuales.

El consenso importa

Mis colegas climatólogos me preguntan con frecuencia si la historia de las placas tectónicas puede ayudarles a rebatir los argumentos de aquellos que niegan la prueba de un cambio climático causado por la actividad humana. Mi respuesta es que sí.

Los críticos de la climatología infravaloran el acuerdo entre expertos. Creen que la ciencia avanza gracias al coraje de individuos como Wegener o Galileo Galilei, capaces de desafiar el statu quo. Sin embargo, pese a la mitología, Isaac Newton, Charles Darwin y Albert Einstein trabajaron en el seno de comunidades científicas que aceptaron sus ideas. Los críticos del cambio climático se inspiran en una rica tradición cultural que glorifica al genio aislado, pero no son conscientes de la importancia del consenso para la ciencia.

El consenso emerge cuando el conocimiento científico madura y se estabiliza. Con notables excepciones, los científicos no se esfuerzan conscientemente por alcanzarlo. Trabajan para desarrollar hipótesis plausibles y obtener los datos pertinentes, que son debatidos en congresos y en publicaciones científicas revisadas por pares. Si los expertos consideran que la prueba es suficiente y su interpretación coherente, la cuestión se da por zanjada. En caso contrario, la investigación continúa. La historia nos ayuda distinguir entre las teorías científicas sujetas a debate y aquellas teorías estables que constituyen un fundamento razonable para la toma de decisiones.

Alcanzar la madurez lleva tiempo. A diferencia de lo que ocurre en la industria, el gobierno o las empresas, la investigación en ciencia no sabe de plazos. Los biógrafos de Wegener cuentan que murió convencido de que otros científicos descubrirían algún día cómo se movían los continentes y que el mecanismo encajaría con su propuesta —como así fue—. Du Toit y Holmes estaban igualmente convencidos.

La ecuanimidad de esos científicos refleja su confianza en la ciencia como sistema. El historiador y filósofo de la ciencia Thomas Kuhn desarrolló en *La estructura de las revoluciones científicas* (Fondo de Cultura, 2006; *The structure of scientific revolutions*, University of Chicago Press, 1962) la visión de la ciencia como un asunto colectivo. El conocimiento cristaliza con la aceptación por parte de la comunidad. Los debates concluyen cuando los científicos se persuaden de que un fenómeno es real y han dado con la explicación correcta. La discusión se pospone entonces hasta la aparición de nuevas pruebas, como ocurrió con la deriva continental.

El cambio climático cuenta con el consenso de la comunidad científica. Los políticos que niegan que esté relacionado con la actividad humana actúan como la jerarquía de la Iglesia católica al rechazar los argumentos de Galileo a favor del heliocentrismo. ¿Hay científicos que lo nieguen de buena fe? Harold Jeffreys, prestigioso catedrático de astronomía de la Universidad de Cambridge (Reino Unido), podría ser un ejemplo. En 1920 rechazó la teoría de la deriva continental, y en 1970, la tectónica de placas. Jeffreys creía que la Tierra era un sólido demasiado rígido para permitir la convección del manto y el movimiento de la corteza. Su punto de vista estaba bien fundamentado matemáticamente, pero se resistió a modificarlo pese a toda la prueba contraria.

Si en los años setenta hubiéramos tenido que tomar una decisión importante en función de si los continentes se mueven o no, habría sido insensato hacer caso a Jeffreys e ignorar el amplio consenso avalado por medio siglo de investigaciones. El caso de Wegener es distinto, porque fue uno de los primeros en proponer una teoría inmadura. En los años veinte, la movilidad de la corteza era materia de debate en la comunidad científica; en los años setenta ya no, porque se había alcanzado el consenso.

Han pasado cincuenta años y la historia no solo no ha vindicado a Jeffreys, sino que hace improbable la vindicación de aquellos que rechazan la prueba masiva a favor de un cambio climático causado por la actividad humana.

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 501, págs. 27-29, 2013. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2013

PARA SABER MÁS

Continent and ocean basin evolution by spreading of the sea floor. R. S. Dietz en *Nature*, vol. 190, págs. 854-857, 1961.
Magnetic anomalies over oceanic ridges. F. J. Vine y D. H. Matthews en *Nature*, vol. 199, págs. 947-949, 1963.
The rejection of continental drift: Theory and method in American Earth science. N. Oreskes. Oxford University Press, 1999.
Plate tectonics: An insider's history of the modern theory of the Earth. Dirigido por N. Oreskes. Westview Press, 2001.
Blackett: Physics, war, and politics in the Twentieth century. M. J. Nye. Harvard University Press, 2004.

por Veronique Kiermer

Veronique Kiermer, doctora en biología molecular, es directora del departamento de autores y revisión de Nature Publishing Group.



La reproducibilidad en biología

La complejidad de los sistemas biológicos dificulta la replicación de los experimentos

La ciencia funciona mediante iteraciones. Los investigadores repiten el trabajo de sus colegas y se basan en sus descubrimientos. Las revistas que publican los artículos revisados por pares registran este tipo de avance progresivo. Sin embargo, en los últimos años, ciertos informes sugieren que muchos científicos son incapaces de reproducir los resultados publicados por otros. ¿Quiere ello decir que el progreso científico se encuentra en una situación crítica sin precedentes? Antes de extraer esta conclusión, consideremos los cambios en la naturaleza de la ciencia y, en particular, de la biología.

La investigación biomédica básica y su aplicación en tratamientos para curar enfermedades constituyen el centro de esta cuestión. En un mundo ideal, los científicos del sector académico identifican dianas para los fármacos (habitualmente proteínas que intervienen en procesos patológicos) y los del sector industrial buscan sustancias que interfieran con la función de estas dianas. En la realidad, sin embargo, los segundos constatan a menudo su incapacidad para reproducir los efectos obtenidos por los primeros de forma lo bastante robusta como para justificar el desarrollo de un medicamento. Peor aún: gran parte de los fármacos experimentales no superan los ensayos clínicos de fase II, en los que se analiza su eficacia.

El mundo parecía más sencillo en los años setenta, cuando la biología molecular nos brindó conceptos como «el gen A codifica la proteína B, que desempeña la función C». A partir de este esquema, los científicos elucidaron mecanismos asombrosos y, en ocasiones, diseñaron medicamentos eficaces (como el anticanceroso Glivec, ejemplo modélico de este enfoque reduccionista). ¿No sería maravilloso que la investigación farmacológica siguiera así para siempre?

Sin embargo, esas primeras drogas se encontraban al alcance de la mano. Pero los procesos biológicos entrañan gran complejidad; no pueden reducirse a simples diagramas. No son lineales e independientes, sino que constituyen redes estrechamente interconectadas. Y en cada rama de estas redes existen controles jerarquizados que modifican constantemente la naturaleza y la cantidad de los agentes moleculares implicados. El funcionamiento interno de las células humanas se conoce poco.

Consideremos la regulación del genoma. Su estudio moderno se inició en los años cincuenta, pero hace solo veinte años que se comenzó a desvelar el complejo abanico de modificaciones de las histonas responsables del fino control que ejerce la cromatina sobre la expresión génica [*véase* «La función reguladora del genoma», por Rafael R. Daga, Silvia Salas-Pino y Paola Gallardo; Investigación y Ciencia, diciembre de 2013]. El hecho de que la interferencia por ARN (otro tipo de regulación génica) sea un proceso conspicuo solo se conoció en el último decenio. ¿Qué nos queda aún por descubrir?



Los biólogos experimentales se enfrentan a la complejidad cada día. Ratones criados con un ADN idéntico se comportan de forma diferente. Dos células cultivadas en una misma placa de Petri no pueden considerarse idénticas. En el entorno variable de una célula, resulta difícil distinguir un cambio relevante para un proceso determinado de otro sin importancia. Además, el trabajo en los laboratorios modernos implica el uso de aparatos sensibles, competencias técnicas específicas y reactivos biológicos (como anticuerpos y enzimas) que, a su vez, son variables.

En esos sistemas complejos, es fácil dejar escapar la presencia de un efecto sistemático y de interés biológico. Por ello, los biólogos deben llevar a cabo amplios estudios que garanticen la significación estadística de las observaciones y realizar análisis autocríticos para evitar sesgos involuntarios. Además, deben ser extremadamente cautelosos para no caer en la trampa de su propio entusiasmo.

A ese respecto, necesitan el apoyo de las instituciones científicas y las revistas que publican sus hallazgos. Algunas revistas (como *Nature*) han introducido listas de control con objeto de asegurarse de que los científicos consideran e indican la información clave de sus experimentos. Los centros de investigación deberían ofrecer más formación y supervisión a los jóvenes científicos. Es importante que los responsables de estos centros y sus financiadores controlen sus sistemas de incentivación para reducir el exceso de presión ejercido sobre los investigadores y promover las buenas prácticas.

La reproducibilidad sigue siendo importante, pero es inevitable que los resultados obtenidos en una línea celular no se asemejen con exactitud a los obtenidos en otra. Además, es posible que no puedan predecir completamente lo observado en los modelos animales y, menos aún, en los humanos. La bibliografía sobre este tipo de trabajos sigue siendo robusta. Para seguir en esta dirección, la comunidad científica debe evitar la autocomplacencia. Es importante prestar atención a la profesionalidad de los investigadores y tener en cuenta la complejidad de la biología.

SAM FALCONER

CATÁLOGO DE PRODUCTOS

PROMOCIONES

5 EJEMPLARES AL PRECIO DE 4

Ahorre un 20 %

5 ejemplares de *MENTE Y CEREBRO* o 5 ejemplares de *TEMAS* por el precio de 4 = 26,00 €

SELECCIONES TEMAS

Ahorre más del 30 %

Ponemos a su disposición grupos de 3 títulos de *TEMAS* seleccionados por materia.

3 ejemplares al precio de 2 = 13,00 €

1. ASTRONOMÍA
Planetas, Estrellas y galaxias, Presente y futuro del cosmos
2. BIOLOGÍA
Nueva genética, Virus y bacterias, Los recursos de las plantas
3. COMPUTACION
Máquinas de cómputo, Semiconductores y superconductores, La información
4. FÍSICA
Núcleos atómicos y radiactividad, Fenómenos cuánticos, Fronteras de la física
5. CIENCIAS DE LA TIERRA
Volcanes, La superficie terrestre, Riesgos naturales
6. GRANDES CIENTÍFICOS
Einstein, Newton, Darwin
7. MEDICINA
El corazón, Epidemias, Defensas del organismo
8. CIENCIAS AMBIENTALES
Cambio climático, Biodiversidad, El clima
9. NEUROCIENCIAS
Inteligencia viva, Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente, El cerebro, hoy
11. LUZ Y TÉCNICA
La ciencia de la luz, A través del microscopio, Física y aplicaciones del láser
12. ENERGÍA
Energía y sostenibilidad, El futuro de la energía (I), El futuro de la energía (II)

TAPAS DE ENCUADERNACIÓN

DE *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*
ANUAL (2 tomos) = 10,00 €
más gastos de envío = 5,00 €



Si las tapas solicitadas, de años anteriores, se encontrasen agotadas remitiríamos, en su lugar, otras sin la impresión del año.

MENTE y CEREBRO

Precio por ejemplar: 6,50€

MyC 1: Conciencia y libre albedrío
MyC 2: Inteligencia y creatividad
MyC 3: Placer y amor
MyC 4: Esquizofrenia
MyC 5: Pensamiento y lenguaje
MyC 6: Origen del dolor
MyC 7: Varón o mujer: cuestión de simetría
MyC 8: Paradoja del samaritano
MyC 9: Niños hiperactivos
MyC 10: El efecto placebo
MyC 11: Creatividad
MyC 12: Neurología de la religión
MyC 13: Emociones musicales
MyC 14: Memoria autobiográfica
MyC 15: Aprendizaje con medios virtuales
MyC 16: Inteligencia emocional
MyC 17: Cuidados paliativos
MyC 18: Freud
MyC 19: Lenguaje corporal
MyC 20: Aprender a hablar
MyC 21: Pubertad
MyC 22: Las raíces de la violencia
MyC 23: El descubrimiento del otro
MyC 24: Psicología e inmigración
MyC 25: Pensamiento mágico
MyC 26: El cerebro adolescente
MyC 27: Psicograma del terror
MyC 28: Sibaritismo inteligente
MyC 29: Cerebro senescente
MyC 30: Toma de decisiones
MyC 31: Psicología de la gestación
MyC 32: Neuroética
MyC 33: Inapetencia sexual
MyC 34: Las emociones *
MyC 35: La verdad sobre la mentira
MyC 36: Psicología de la risa
MyC 37: Alucinaciones
MyC 38: Neuroeconomía
MyC 39: Psicología del éxito
MyC 40: El poder de la cultura
MyC 41: Dormir para aprender
MyC 42: Marcapasos cerebrales
MyC 43: Deconstrucción de la memoria
MyC 44: Luces y sombras de la neurodidáctica
MyC 45: Biología de la religión
MyC 46: ¡A jugar!
MyC 47: Neurobiología de la lectura
MyC 48: Redes sociales
MyC 49: Presiones extremas
MyC 50: Trabajo y felicidad
MyC 51: La percepción del tiempo
MyC 52: Claves de la motivación
MyC 53: Neuropsicología urbana
MyC 54: Naturaleza y psique
MyC 55: Neuropsicología del yo
MyC 56: Psiquiatría personalizada
MyC 57: Psicobiología de la obesidad
MyC 58: El poder del bebé
MyC 59: Las huellas del estrés
MyC 60: Evolución del pensamiento
MyC 61: TDAH
MyC 62: El legado de Freud
MyC 63: ¿Qué determina la inteligencia?
MyC 64: Superstición
MyC 65: Competición por el cerebro
MyC 66: Estudiar mejor
MyC 67: Hombre y mujer

(*) Disponible solo en formato digital

MENTE y CEREBRO Cuadernos

Precio por ejemplar: 6,90€

Cuadernos 1: El cerebro
Cuadernos 2: Emociones
Cuadernos 3: Ilusiones
Cuadernos 4: Las neuronas
Cuadernos 5: Personalidad, desarrollo y conducta social
Cuadernos 6: El mundo de los sentidos
Cuadernos 7: El sueño
Cuadernos 8: Neuroglía

TEMAS de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,50€

T-1: Grandes matemáticos *
T-2: El mundo de los insectos *
T-3: Construcción de un ser vivo *
T-4: Máquinas de cómputo
T-5: El lenguaje humano *
T-6: La ciencia de la luz
T-7: La vida de las estrellas
T-8: Volcanes
T-9: Núcleos atómicos y radiactividad
T-10: Misterios de la física cuántica *
T-11: Biología del envejecimiento *
T-12: La atmósfera
T-13: Presente y futuro de los transportes
T-14: Los recursos de las plantas
T-15: Sistemas solares
T-16: Calor y movimiento
T-17: Inteligencia viva
T-18: Epidemias
T-19: Los orígenes de la humanidad *
T-20: La superficie terrestre
T-21: Acústica musical
T-22: Trastornos mentales
T-23: Ideas del infinito
T-24: Agua
T-25: Las defensas del organismo
T-26: El clima
T-27: El color
T-28: La consciencia *
T-29: A través del microscopio
T-30: Dinosaurios
T-31: Fenómenos cuánticos
T-32: La conducta de los primates
T-33: Presente y futuro del cosmos
T-34: Semiconductores y superconductores
T-35: Biodiversidad
T-36: La información
T-37: Civilizaciones antiguas
T-38: Nueva genética
T-39: Los cinco sentidos
T-40: Einstein
T-41: Ciencia medieval
T-42: El corazón
T-43: Fronteras de la física
T-44: Evolución humana
T-45: Cambio climático
T-46: Memoria y aprendizaje
T-47: Estrellas y galaxias
T-48: Virus y bacterias
T-49: Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente
T-50: Newton
T-51: El tiempo *
T-52: El origen de la vida *
T-53: Planetas
T-54: Darwin
T-55: Riesgos naturales
T-56: Instinto sexual
T-57: El cerebro, hoy
T-58: Galileo y su legado
T-59: ¿Qué es un gen?
T-60: Física y aplicaciones del láser
T-61: Conservación de la biodiversidad
T-62: Alzheimer
T-63: Universo cuántico *
T-64: Lavoisier, la revolución química
T-65: Biología marina
T-66: La dieta humana: biología y cultura
T-67: Energía y sostenibilidad
T-68: La ciencia después de Alan Turing
T-69: La ciencia de la longevidad
T-70: Orígenes de la mente humana
T-71: Retos de la agricultura
T-72: Origen y evolución del universo
T-73: El sida
T-74: Taller y laboratorio
T-75: El futuro de la energía (I)
T-76: El futuro de la energía (II)

(*) Disponible solo en formato digital

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,50€



BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN

Edición en rústica

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
012-3	El sistema solar	12 €
016-6	Tamaño y vida	14 €
025-5	La célula viva	32 €
038-7	Matemática y formas óptimas	21 €

Edición en tela

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
004-2	La diversidad humana	24 €
013-1	El sistema solar	24 €
015-8	Partículas subatómicas	24 €
017-4	Tamaño y vida	24 €
027-1	La célula viva (2 tomos)	48 €
031-X	Construcción del universo	24 €
039-5	Matemática y formas óptimas	24 €
046-8	Planeta azul, planeta verde	24 €
054-9	El legado de Einstein	24 €

GASTOS DE ENVÍO

(Añadir al importe del pedido)

	España	Otros países
1er ejemplar	2,00 €	4,00 €
Por cada ejemplar adicional	1,00 €	2,00 €

Para efectuar su pedido:
Teléfono: (34) 934 143 344
A través de nuestra Web:
www.investigacionyciencia.es

Las ofertas son válidas hasta agotar existencias.

FÍSICA DE PARTÍCULAS

«Hemos caído en la tentación de vender descubrimientos»

SERIE

LA FÍSICA DE PARTÍCULAS ANTES Y DESPUÉS DEL BOSÓN DE HIGGS

1. **El problema de la supersimetría**
   Joseph Lykken y Maria Spiropulu
   Junio de 2014

2. **Los orígenes históricos del mecanismo de Higgs**
   Miguel Á. Vázquez-Mozo
   Julio de 2014

3. **Más allá del modelo estándar: Una visión fenomenológica**
   Entrevista con Álvaro de Rújula
   Agosto de 2014

4. **Física de partículas y cosmología: Perspectivas teóricas**
   Entrevista con Luis Álvarez-Gaumé
   Septiembre de 2014

Entrevista con Álvaro de Rújula, investigador veterano del CERN, sobre la situación de la física de altas energías después del descubrimiento del bosón de Higgs

Ernesto Lozano Tellechea

EN SÍNTESIS

Álvaro de Rújula es desde 1977 miembro de la División de Teoría del CERN. En los años setenta, varios de sus trabajos ayudaron a apuntalar el modelo estándar de la física de partículas.

Reconocido experto en física de neutrinos, durante los últimos años también ha investigado fenómenos de altas energías en astrofísica, como los rayos cósmicos y los estallidos de rayos gamma.

De Rújula habla en esta entrevista sobre las consecuencias del descubrimiento del bosón de Higgs y sobre los principales problemas a los que aún se enfrenta la física teórica.



LAURENT GUIRAUD/CERN

Álvaro de Rújula,

físico del CERN y del Instituto de Física Teórica de la Universidad Autónoma de Madrid y el CSIC, ha sido testigo directo de buena parte de los avances que condujeron a la formulación definitiva del modelo estándar. En los años setenta, durante su época en Harvard, varios de sus trabajos pusieron orden en la avalancha de nuevas partículas que desde hacía un tiempo habían comenzado a aparecer en los aceleradores. Junto con otros investigadores de la institución, De Rújula contribuyó en esos años a interpretar correctamente la estructura del mesón J/ψ, una partícula considerada clave en la historia del modelo estándar por cuanto confirmó la existencia de un nuevo tipo de quark, lo que consolidó el modelo que describía estos constituyentes elementales. También predijo con acierto las propiedades de varios hadrones y determinó la escala de energías característica de la cromodinámica cuántica, un parámetro fundamental de la naturaleza. Aunque las piezas básicas estaban sobre la mesa, aquel nexo entre teoría y datos empíricos permitió juntarlas y apuntalar la cromodinámica cuántica como descripción moderna y veraz de las interacciones fuertes.

El físico es desde 1977 miembro permanente de la División de Teoría del CERN, el laboratorio que en 1983 descubrió los bosones W y Z (las partículas mediadoras de la interacción débil) y, en 2012, el bosón de Higgs. En su búsqueda de la famosa partícula, una de las técnicas de análisis empleadas por la colaboración CMS se basó en un trabajo publicado en 2010 por De Rújula y otros colaboradores en *Physical Review D*. En él señalaban un método para deducir la presencia del bosón de Higgs a partir del entrelazamiento cuántico de algunos de sus productos de desintegración. «Es bonito porque se trata de la misma propiedad que Einstein consideraba un sinsentido de la mecánica cuántica», observa el investigador. «Pero aquello que una vez parecía una insuperable paradoja pasó luego a formar parte de la realidad de las cosas, hasta el punto de que hoy es un método que nos permite hacer descubrimientos.»

Dentro de la comunidad de físicos teóricos, De Rújula se considera principalmente un fenomenólogo: alguien a quien le gusta confrontar teoría y observaciones. «Al ver una cabra negra desde un tren en España, el experimentador dirá que todas las cabras españolas son negras; el fenomenólogo se limitará a afirmar que esa cabra en concreto es negra, y el teórico, que solo cabe concluir que la mitad izquierda de la cabra es negra», ejemplifica.

EL DETECTOR CMS, en el Gran Colisionador de Hadrones, fue uno de los dos grandes experimentos que en 2012 descubrieron el bosón de Higgs.

CERN

Reconocido experto en física de neutrinos, durante los últimos años ha dedicado parte de su tiempo a desarrollar una teoría no ortodoxa sobre los rayos cósmicos y los estallidos de rayos gamma, uno de los fenómenos astrofísicos más energéticos que se conocen. La razón, explica, no era otra que mantenerse con las uñas afiladas en unos años en los que la física de partículas casi no ofrecía indicios empíricos.

Tras una larga parada técnica, el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) tiene previsto reanudar sus experimentos a principios del año próximo. De Rújula habla en esta entrevista, realizada en el CERN, de las perspectivas experimentales y de los problemas que aún persisten en física de partículas.

¿Dónde se encuentra la física de partículas después del descubrimiento del bosón de Higgs?
Es el fin de una época. Y en la historia de la ciencia los finales de una época siempre han sido los principios de otra. No sabemos cuál será la siguiente, pero tampoco estamos más perdidos que nunca. Aún quedan problemas clave que tendrán que resolverse. Los principales son la materia oscura y la constante cosmológica. Que no sé hasta qué punto son física de partículas... aunque todo es física de partículas en el fondo, incluso la cosmología.

Desde hace dos o tres décadas, una de las razones más empleadas para argumentar a favor de la existencia de nuevas partículas por encima de la escala del modelo estándar ha sido el problema de la «naturalidad», o del «ajuste fino», del bosón de Higgs; el hecho de que, en principio, su masa debería ser muchísimos órdenes de magnitud mayor que la de los bosones W y Z. ¿Se trata de un problema fundamental, o es más bien un prejuicio estético?
Es un problema en el sentido de que no se ajusta a la estructura de las teorías que entendemos. Quizá no se trate del problema más fundamental al que nos enfrentamos, y puede que deje de serlo el día que aprendamos algo más. Pero me parece razonable concluir que, dentro de las teorías efectivas, que son las que entendemos hoy en día, sí representa un problema. Pero el modelo estándar es más que una teoría efectiva, es una teoría de verdad.

Una de las propuestas más antiguas para resolverlo ha sido siempre la supersimetría. ¿Qué opina al respecto?
No sé cuánto debería extenderme... Tengo un colega que opina que Diosa —porque él cree que Dios, si existiese, sería hembra— hizo el universo a voleo. Pero piensa que Diosa tiene también buen gusto, lo cual quiere decir que cada siete días, cuando debería descansar, se lee los artículos recientes de física y decide cuáles le agradan y cuáles no. Y cuando encuentra alguno irresistiblemente bonito, como el de la teoría de la relatividad general de Einstein, decide que es cierto. Y que debe serlo no solo para el futuro, sino también para el pasado. Así es como, poco a poco, se va construyendo esta elegantísima versión que tenemos de las leyes del universo.

La supersimetría es una teoría muy elegante, por lo que, según este punto de vista, tendría que ser cierta. Por eso hace unos veinte años Diosa decidió que el mundo fuese supersimétrico. Pero poco después la supersimetría se convirtió en una especie de religión para los científicos: algo en lo que creían con independencia de cualquier consideración observacional. Así que, como castigo, Diosa decidió que ya no le gustaba la supersimetría. Y por eso no la hemos descubierto.

Un colega muy ocurrente...
Es cierto que la supersimetría posee un gran atractivo estético. Y que, por algún motivo, las teorías científicas básicas son siempre elegantísimas: no poseen más que unos pocos principios muy claros. A veces esos principios dan lugar a estructuras muy complejas, como el cerebro humano, pero las leyes fundamentales son siempre muy simples. De modo que tendemos a considerar que las teorías más bellas y sencillas son probablemente las más correctas. La supersimetría cae sin duda en el dominio de las teorías tan atractivas que deberían ser ciertas.

Sin embargo, todos los modelos explícitos de supersimetría son feísimos. La supersimetría predice que, por cada partícula que conocemos, tendría que haber otra de la misma masa.

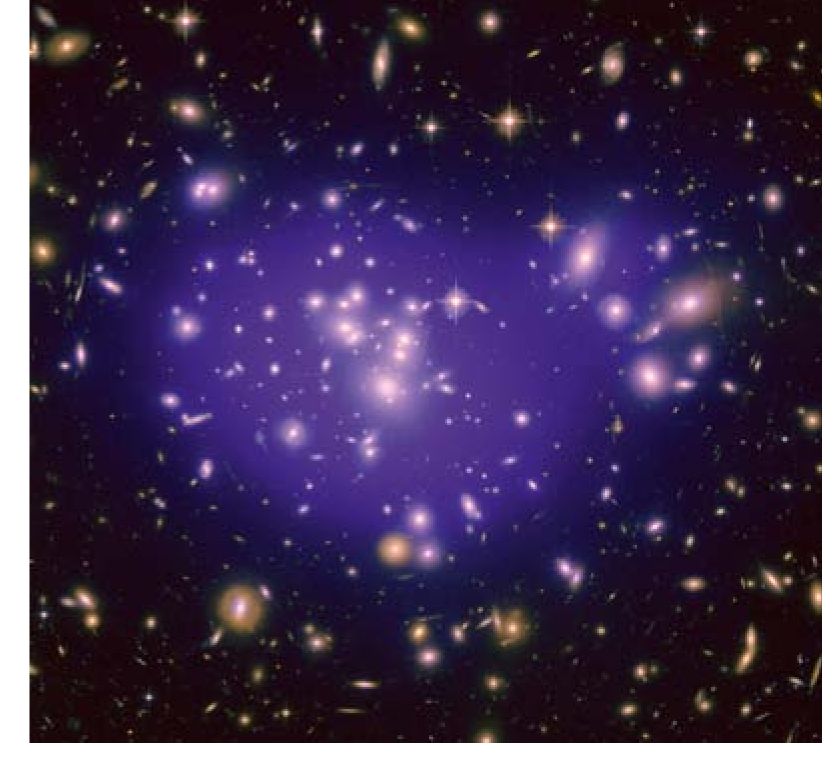


IMAGEN DEL CÚMULO DE GALAXIAS ABELL 1689 tomada en 2002 por el telescopio espacial Hubble. La distribución inferida de materia oscura se muestra en colores falsos (*azul*).

NASA, ESA, E. JULLO (LABORATORIO DE PROPULSIÓN A CHORRO), P. NATARAJAN (UNIVERSIDAD YALE) Y J.-P. KNEIB (LABORATORIO DE ASTROFÍSICA DE MARSELLA, CNRS)

«La idea general de la supersimetría es muy atractiva. Lo que no resulta nada elegante son las miles de maneras que se han propuesto para romperla»

Dado que esto no se observa, sabemos que la supersimetría ha de estar rota. Y lo que no resulta nada elegante son las miles de maneras que se han propuesto para romper la supersimetría. El modelo supersimétrico llamado «mínimo» lo es en su credibilidad. Así que, aunque uno se sienta inclinado a creer en la supersimetría, si mira con atención sus realizaciones prácticas comenzará a ser menos fanático.

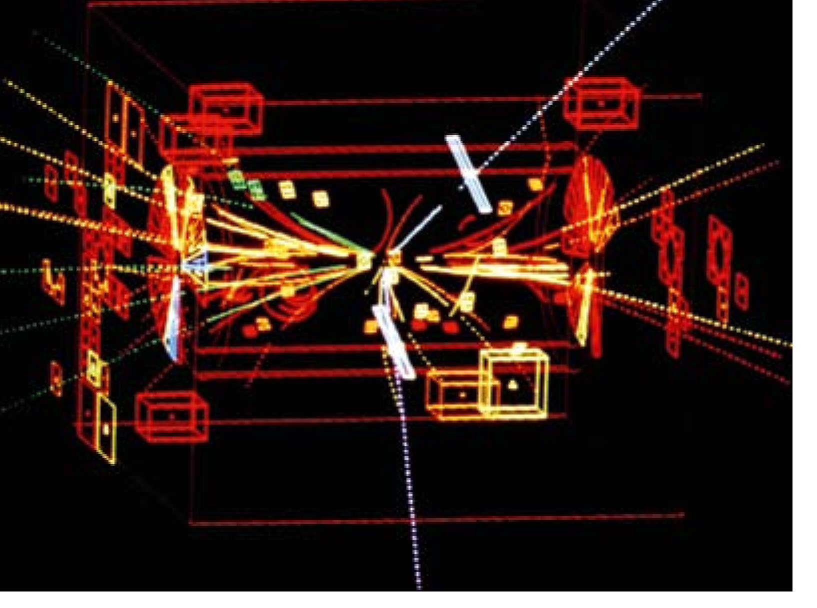
Ese es mi caso. No me gusta ninguna de las posibilidades conocidas para romper la supersimetría, por lo que no creo que podamos decir nada concreto o esperanzador sobre ella a corto plazo. Naturalmente, me encantaría equivocarme.

El LHC ya ha descartado una parte considerable de los modelos supersimétricos más simples. Supongamos sin embargo que las partículas supersimétricas comienzan a aparecer el año que viene, cuando el LHC opere a 13 o 14 teraelectronvoltios (TeV). En tal caso, ¿cree que las nuevas partículas estarían resolviendo el problema de la naturalidad del higgs, o la escala de la supersimetría estaría ya tan alta que continuaría habiendo un problema de ajuste fino?
Depende de cómo aparezcan. Pero parece posible que sí, ya que, en términos generales, la supersimetría ayuda a resolver el problema de la naturalidad.

Este problema surge porque, en las teorías que conocemos, todo lo que no está prohibido es obligatorio. Y una de las cosas que no están prohibidas es que la masa del higgs tome un valor enorme, muchísimo mayor que el que se ha medido en el LHC. Como eso debería ocurrir de manera natural y no ocurre, hay algo que no entendemos. La supersimetría lo resuelve porque el «tirón» que la física conocida le da a la masa del higgs queda compensado por el «antitirón» que recibe de las partículas supersimétricas.

Otra particularidad de la masa del bosón de Higgs, aparte de su orden de magnitud, es el valor concreto que se ha medido en el LHC: 126 GeV. Ese valor parece implicar que el universo se encontraría muy próximo al límite de estabilidad. ¿Cómo lo interpreta?
Tiene pinta de ser una señal de algo. Es interesante porque quiere decir que, si el modelo estándar se extiende hasta energías mucho más altas sin modificaciones importantes, entonces el universo en el que vivimos sería metaestable: habría otro estado del universo con menos energía por unidad de volumen, por lo que, tarde o temprano, «caeríamos» a él.

Aún no sabemos exactamente cuándo ocurrirá algo así. El tiempo de vida medio del universo depende del valor de algunos parámetros que aún no hemos medido con suficiente precisión, como la masa del quark *top*. En todo caso, ese final catastrófico estaría aún muy lejos, mucho más que el cataclismo inevitable



PRIMERA DETECCIÓN DE UN BOSÓN *Z*, el mediador neutro de las interacciones débiles. La imagen fue captada el 30 de abril de 1983 por el experimento UA1 del CERN.

CERN

que sufrirá la Tierra cuando, dentro de varios miles de millones de años, el Sol se convierta en una estrella gigantesca y nos abrase. O los cataclismos climáticos de los que seremos responsables.

Parece una coincidencia interesante. El bosón de Higgs nos ha enseñado algo que va más a allá de su propia existencia: que el universo podría no ser estable. Pero no es preocupante, no va a ocurrir antes de las próximas elecciones.

Si tuviese que apostar, ¿dónde cree que surgirá la primera señal de física más allá del modelo estándar?

Nuestra especialidad es la única de la ciencia en la que nos ponemos muy tristes cuando las cosas funcionan bien. En general sucede lo contrario: la gente se alegra cuando todo marcha. Pero nosotros sufrimos porque el modelo estándar funciona de maravilla.

El modelo estándar no va a derrumbarse. Le pasará como a la mecánica de Newton, que fue superada por una física más precisa, como la de Einstein. Pero está tan bien establecido que no puede ser falso. No describe por completo la verdad, pero es parte de ella.

En cuanto a posibles señales de nueva física, de momento ya hay una, si bien puede discutirse hasta qué punto va más allá del modelo estándar: el hecho de que los neutrinos tengan masa y «oscilen» [que los neutrinos de una especie se transmuten espontáneamente en neutrinos de otra]. Pero si tuviera que apostar, diría que el próximo gran descubrimiento será una detección no gravitacional de la materia oscura. Creo que es cuestión de tiempo que alguno de los numerosos experimentos que en la actualidad la están buscando desde laboratorios subterráneos, como el de Canfranc, encuentren tarde o temprano una señal inconfundible de estas partículas. Espero que temprano.

¿Tiene algún candidato favorito para explicar la materia oscura?

No. Quizás el axion, aunque de ser el caso no lo encontrarán fácilmente. Pero incluso si la materia oscura está formada por axiones, me parece posible que se pueda identificar pronto.

Hay que tener en cuenta que entender la materia oscura nos obliga a inventar cinco sextas partes de la materia del universo. Para describirla hemos de idear una física completamente nueva. No creo que haya ninguna razón de peso para concluir que la materia oscura deba ser algo sencillo, como la partícula supersimétrica estable y neutra más ligera, por ejemplo. La parte del universo que sí entendemos, la materia ordinaria, ya resulta bastante complicada. Las leyes que la rigen son muy sencillas, pero el número de ingredientes que la componen es elevado.

De las partículas ordinarias, probablemente las peor conocidas sean los neutrinos. ¿Espera sorpresas en física de neutrinos?

La sorpresa principal quizá ya ha llegado: los parámetros de la naturaleza parecen escogidos para que la física de neutrinos resulte lo más interesante posible al tiempo que experimentalmente factible. La masa de los neutrinos, cómo se mezclan unos con otros, la densidad de la Tierra, la densidad del Sol, las reacciones que hacen que el Sol brille, el radio del Sol, su perfil de densidad, el perfil de densidad de la Tierra, la existencia de piones y muones, que son partículas de vida larga que se desintegran en la atmósfera, la densidad de la atmósfera... Todos esos parámetros parecen haber sido escogidos para que los experimentos puedan realizar sus medidas de manera eficaz. Hasta ahora, la física de neutrinos ha sido siempre tal que nos permite medir lo que queremos.

Espero que el siguiente paso, consistente en medir no ya sus diferencias de masa, sino las masas mismas y la posible violación de *CP*, resulte posible de aquí a veinte años.

¿Hay algún mecanismo de generación de masa para los neutrinos que le parezca más atractivo que otros?

Hay una teoría muy bonita, debida a Ettore Majorana, el físico italiano que desapareció misteriosamente, según la cual neutrinos y antineutrinos serían la misma partícula. Estos neutrinos, que reciben el nombre de neutrinos de Majorana, serían más sencillos que los electrones. Acerca de los electrones podemos decir que hay cuatro: el electrón y el positrón, cada uno de ellos con sus dos estados de espín. Un neutrino, si es de Majorana, no sería cuatro partículas, sino solo dos.

Los neutrinos de Majorana sugieren además la existencia de una nueva forma de generar masa, conocida como «mecanismo de la sierra» —en el sentido de algo que sube y baja, como la sierra de Madrid—, según el cual la masa de los neutrinos provendría de física mucho más allá del modelo estándar.

Pero, de nuevo, no existe ningún modelo explícito que nos dicte las masas de los neutrinos ni cuánto se mezclan unos con otros. Todo eso resulta completamente arbitrario y no lo entendemos en absoluto. Hay unos cien artículos por mes sobre este tema y ninguno es concluyente.

Usted ha vivido varios descubrimientos históricos en física de partículas, como la «revolución de noviembre» de 1974, desencadenada por el hallazgo de la partícula J/ψ. ¿Cuál fue la importancia de aquellos hallazgos y cuál la del bosón de Higgs?

La revolución de noviembre del año 74 fue algo mucho más emocionante que el descubrimiento del bosón de Higgs. Con una diferencia enorme, ya que en aquella época nuestra ignorancia era muy superior a la actual. ¡Ni siquiera sabíamos si existían los quarks o no!

Aquello fue una revolución mucho más amplia y de consecuencias mucho mayores que el descubrimiento del bosón de Higgs, que en el fondo no es sino la decimoctava partícula del modelo estándar. Allí fue donde entendimos las otras diecisiete, por así decirlo.

Durante los últimos años usted se ha dedicado a investigar algunos fenómenos astrofísicos de alta energía, como los estallidos de rayos gamma y los rayos cósmicos. ¿Cómo nació su interés por ellos?

Dediqué varios años a esos problemas porque la física de partículas atravesaba un largo momento en el que no ocurría nada realmente nuevo. No había nuevos descubrimientos que explicar. Y como a mí lo que me gusta es enfrentarme a problemas resolubles, me dediqué a asuntos que no eran de física de partículas para entretenerme y para mantenerme con las uñas afiladas.

En mi opinión se trata de dos problemas físicos que admiten una solución muy sencilla, que, sin embargo, no es aceptada en absoluto por quienes trabajan en el tema.

¿Podría resumir su propuesta para explicar esos fenómenos?

Tanto la gran mayoría de los rayos cósmicos como todos los estallidos de rayos gamma están generados por explosiones de supernova. Me refiero a aquellas supernovas en las que el núcleo de la estrella colapsa y se convierte en una estrella de neutrones o en un agujero negro.

Nadie entiende en detalle cómo explotan esas supernovas, ya que se trata de un problema muy complejo para el que no disponemos de las herramientas matemáticas adecuadas. Las complicaciones aparecen porque las estrellas giran y porque el campo magnético desempeña un papel muy importante, dos aspectos difíciles de tener en cuenta.

«La gravedad cuántica es uno de los motivos más claros para pensar que tiene que haber nueva física»

Pero lo que sí se sabe es que, cuando sobre un objeto como una estrella de neutrones o un agujero negro cae materia desde el exterior, se emiten chorros de partículas en la dirección del eje alrededor del cual gira el astro. Esto se observa muy claramente en las imágenes de cuásares, enormes agujeros negros en otras galaxias que están engullendo su entorno.

Nuestra teoría, desarrollada fundamentalmente con Arnon Dar y Shlomo Dado [del Instituto Technion de Haifa, en Israel], es que los rayos cósmicos de alta energía y los estallidos de rayos gamma no se deben a la explosión más o menos esférica de la estrella, sino a los chorros de partículas que las supernovas producen cuando implosionan y explosionan simultáneamente.

Esa manera de ver el fenómeno, como consecuencia de los chorros y no de la explosión esférica, es una de las diferencias entre nuestra teoría y las demás, tanto en lo que se refiere a los rayos cósmicos como a los estallidos de rayos gamma. Buena parte de las cosas que hoy en día se consideran establecidas eran predicciones de nuestra teoría, no de las teorías estándar.

¿Qué clase de predicciones?

Antes de que los datos lo hiciesen inevitable, nadie creía que los estallidos de rayos gamma estuvieran siempre asociados a una supernova. Nuestra teoría resultaba tan clara en este sentido que, cierto día de 2003 en que se observó un estallido de rayos gamma, predijimos qué día se descubriría la supernova, con una precisión de ocho horas, y cómo sería la explosión. Y esa supernova se encontró tal y como habíamos vaticinado.

En otra explosión de rayos gamma, también muy especial, predijimos que al cabo de 40 o 50 días se verían en el cielo dos puntos de luz en ondas de radio, claramente separados y bien visibles. Eso es justo lo contrario de lo que cabría esperar de una explosión esférica. Nuestros puntos eran dos «bolas de cañón» debidas al chorro producido por el estallido de rayos gamma. La teoría nos permitía predecir cuándo esas bolas iban a alejarse lo suficiente para poder verlas como dos puntos separados en radio, que es una banda para la que hay una gran precisión angular. Eso también lo descubrieron.

Un problema reciente al que usted ha dedicado cierta atención es la discrepancia en las medidas del radio del protón: sin ninguna razón aparente, un nuevo tipo de experimento ha arrojado valores muy alejados de los obtenidos con anterioridad. Los autores creen posible que esa divergencia constituya una señal de nueva física. ¿Podría explicar cuál es el problema y cuál la explicación propuesta por usted?

El supuesto problema apareció porque la medida del radio del protón en cierto tipo de experimentos no concordaba con lo que cabía esperar a partir del modelo estándar y del conjunto de observaciones que sabemos que dependen del radio de esa partícula. En mi opinión, todo pudo ser consecuencia de un mal análisis de los datos.

En estos experimentos hay que realizar dos mediciones independientes: una que depende del radio del protón al cuadrado y otra que es función del radio del protón al cubo. Pero estas últimas, en lugar de tomarse directamente, se dedujeron a partir del análisis del radio del protón al cuadrado. Por tanto, no eran independientes. El cálculo era además terriblemente optimista desde el punto de vista estadístico. Como resultado, los investigadores afirmaron haber obtenido un parámetro con una precisión muy superior a la que realmente —opino— podía extraerse de los datos experimentales.

Todo ello tiene que ver con el hecho de que, en los experimentos de dispersión de electrones sobre protones, resulta muy difícil analizar los datos a pequeñas transferencias de impulso.

Usted es un físico teórico cuyo trabajo ha estado siempre muy ligado a los datos experimentales. ¿Qué opinión le merece la teoría de cuerdas?

Es otra teoría que debería ser cierta. Pero, como por ahora no ha establecido ningún contacto explícito con la realidad —es decir, no ha hecho ninguna predicción que pueda demostrarse experimentalmente falsa—, no forma realmente parte de la física.

Por más que esté basada en la física, que quepa la posibilidad de que sea cierta, que resulte muy elegante y que contenga la gravedad de un modo natural y precioso, sigue estando un poco más allá de la filosofía natural. Con énfasis en *natural*, que quiere decir observable.

¿Y qué piensa de la gravedad? ¿Está la física actual muy lejos de explicar la gravedad cuántica?

En este asunto el único paso aceptable que se ha dado es la teoría de cuerdas. Y la teoría de cuerdas implica consecuencias revolucionarias, como que el espacio y el tiempo no tienen cuatro dimensiones en total, sino diez u once, y que las dimensiones

extra no se ven porque estarían enrolladas sobre sí mismas, formando un diminuto subespacio en cada punto del espacio normal... Todas ellas constituyen elegantes posibilidades que, quizá, podrían estudiarse independientemente de la teoría de cuerdas. Eso es algo en lo que, desgraciadamente, no hemos avanzado mucho. El que aún no dispongamos de una teoría cuántica de la gravedad es algo que debería quitarnos el sueño a todos, por lo menos un rato, todas las noches.

La gravedad cuántica es uno de los motivos más claros para pensar que tiene que haber nueva física más allá de la que conocemos. Hay quien opina que las propiedades del universo original observadas hoy en día ya aportan una pista de que también la gravedad es un fenómeno cuántico. Aunque establecer esa conclusión a partir de los datos disponibles es discutible.

Supongamos que, al final de su vida útil, los experimentos del LHC a 14 TeV no descubren nada más. La materia oscura no aparece, tampoco lo hacen las partículas supersimétricas, y los acoplamientos del bosón de Higgs con el resto de las partículas se miden y coinciden a la perfección con los predichos por el modelo estándar. ¿Cree que una situación así afectaría a la manera de pensar en la nueva física?
No. Si se hiciesen experimentos a una energía cien veces mayor que la actual y no se encontrase nada nuevo, entonces sí podría haber un impacto importante en la comunidad. Pero en este caso no creo que cambiase casi nada, ya que solo vamos a aumentar la energía en un factor dos.

¿Influiría una situación semejante en las posibilidades de financiar un próximo acelerador?
Es muy probable que afectase negativamente. Pero de eso tenemos la culpa los físicos. Antes no decíamos «puedo prometer y prometo», como Adolfo Suárez, sino «puedo buscar y busco». Y si no encontrábamos nada, seguíamos buscando. Pero esta evolución de la sociedad hacia un modelo mercantil ha hecho que también nosotros «vendamos» cosas; en particular, que vendamos descubrimientos y promesas de descubrimientos. Eso es un error, porque si luego no encontramos nada, quedaremos en una mala posición.

Lo que siempre se ha hecho es recordar que, cada vez que se aumenta la precisión o la energía en un factor de diez, típicamente se encuentra algo nuevo. Si adoptásemos esa actitud, en lugar de la de entristecernos porque todo funciona tan bien, no habría ningún motivo para detenernos donde estamos, ya que sabemos que aún quedan problemas por resolver. De ese modo nos resultaría más fácil hablar con quienes nos financian.

La física no es una máquina de producir descubrimientos. Es una máquina de producir conocimiento. Y de generar resultados que sirven en otros campos. Todo el mundo cita la Web como producto de un programa que escribió Tim Berners-Lee cuando trabajaba en el CERN para que los ordenadores se comunicasen con eficacia. Es un ejemplo, pero hay muchos más. La primera pantalla táctil, que hoy todo el mundo tiene en su teléfono de bolsillo, también se construyó en el CERN. Radiografías de baja exposición, hadroterapia, electrónica de precisión, manejo de datos en cantidades gigantescas... todos ellos han aparecido como productos secundarios de la física fundamental. Y no me refiero solo a la física de partículas.

Todo eso debería apreciarse. Luego hay otro efecto que tampoco se valora, pero porque no tiene precio, que es el avance del conocimiento.

¿A qué atribuye esa inclinación a prometer descubrimientos?
Tiene que ver con la cultura general de la sociedad. Ya no se lucha por ideas básicas, sino solo por objetivos económicos. Se ha rebajado catastróficamente el nivel intelectual y ético de aquello que mueve a la sociedad. Y en esa rebaja general de los valores humanos quizá se salven las artes, pero no tanto la ciencia.

¿Ha llegado la física teórica a un nivel de complejidad tan elevado que obstaculiza su comprensión por parte del gran público?
No. El nivel de complejidad no es grande. Los elementos esenciales de nuestra comprensión de las leyes físicas resultan muy sencillos y pueden enseñarse a cualquiera. Si un físico no sabe explicarlos, es que él no los entiende. Puede que el lego no comprenda los detalles matemáticos, pero las ideas básicas casi casi siempre pueden expresarse en términos sencillos.

Cuando se anunció el descubrimiento del bosón de Higgs, muchas personas que reconocían no entender los detalles del hallazgo mostraron sin embargo una alegría sincera. ¿A qué cree que se debió?
A que somos seres humanos. Y lo que distingue a los seres humanos de los monos es nuestra capacidad para hacernos preguntas sobre cómo son las cosas y, a veces, incluso contestarlas. Solo se trata de una diferencia de grado, pero es una diferencia de grado enorme entre el ser humano y los simios. Bueno, eso y la capacidad para tocar el violín, que es todavía más difícil que la ciencia básica. La gente tiene una pulsión fundamental por entender en qué universo vive y cómo funciona. Es algo básico que compartimos todos. Un interés por la realidad.

Ernesto Lozano Tellechea *es doctor en física teórica y editor de* Investigación y Ciencia.

PARA SABER MÁS

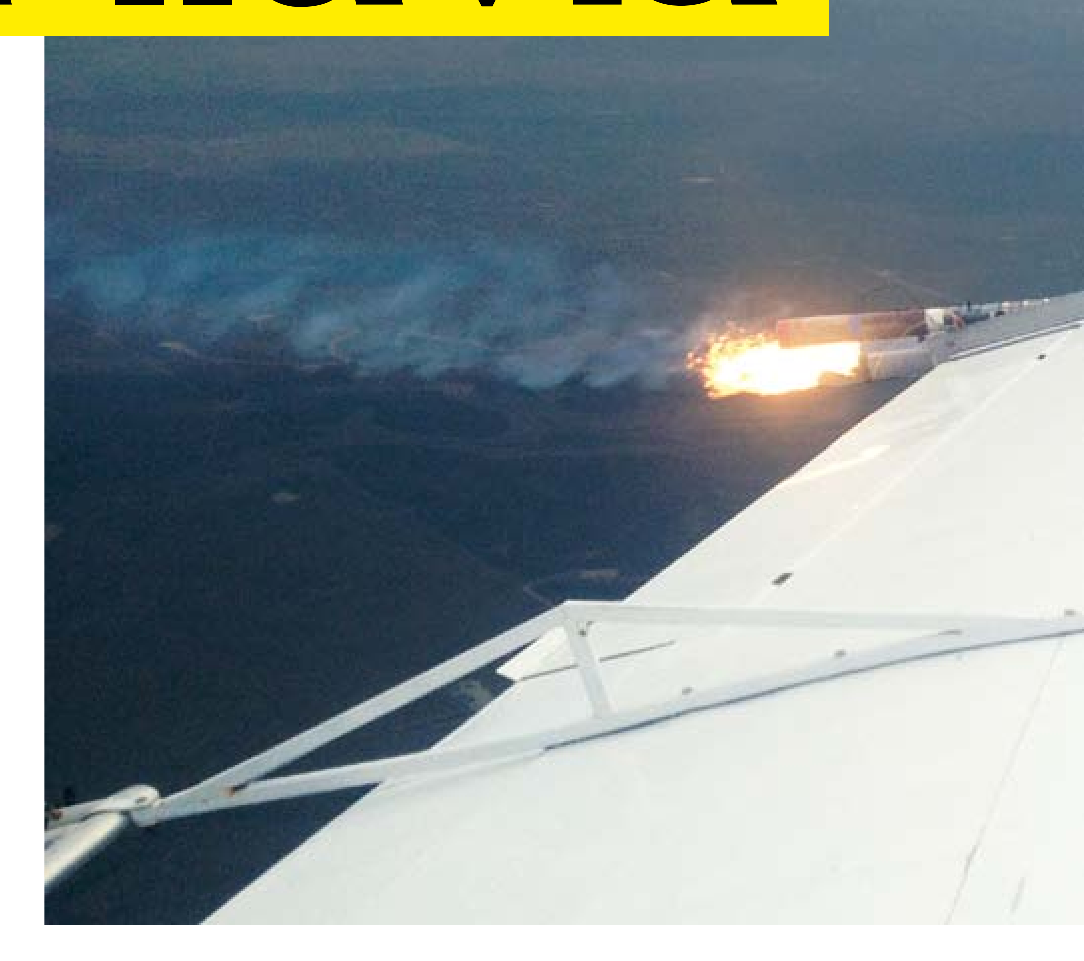
Proton magnetic form factor in asymptotically free field theories. Álvaro de Rújula en *Physical Review Letters*, vol. 32, págs. 1143-1145, 20 de mayo de 1974.
Is bound charm found? Álvaro de Rújula y Sheldon Glashow en *Physical Review Letters*, vol. 34, n.º 1, págs. 46-49, 6 de enero de 1975.
Hadron masses in a gauge theory. Álvaro de Rújula, Howard Georgi y Sheldon Glashow en *Physical Review D*, vol. 12, n.º 1, págs. 147-162, 1 de julio de 1975.
Demythification of electroproduction local duality and precocious scaling. Álvaro de Rújula, Howard Georgi y David Politzer en *Annals of Physics*, vol. 103, págs. 315-353, febrero de 1977.
An introduction to cosmic rays and gamma ray bursts, and to their simple understanding. Álvaro de Rújula en *Proceedings of the 18th International Conference on General Relativity and Gravitation*; dirigido por S. M. Scott y D. E. McClelland. Sydney, julio de 2007. Disponible en **arxiv.org/abs/0711.0970**
QED confronts the radius of the proton. Álvaro de Rújula en *Physics Letters B*, vol. 697, n.º 1, 21 de febrero de 2011. Disponible en **arxiv.org/abs/arXiv:1010.3421**
Fifty years of Yang-Mills theories: A phenomenological point of view. Álvaro de Rújula en *Fifty years of Yang-Mills theory*, dirigido por G. 't Hooft. World Scientific, 2005. Disponible en **arxiv.org/abs/hep-ph/0404215**

EN NUESTRO ARCHIVO

Mundos oscuros. Jonathan Feng y Mark Trodden en *IyC*, enero de 2011.
¿Esconde el bosón de Higgs nueva física? John Ellis en *IyC*, diciembre de 2012.
Mensajeros fantasmales de nueva física. Martin Hirsch, Heinrich Päs y Werner Porod en *IyC*, junio de 2013.
Cuarenta años de libertad asintótica. Antonio González-Arroyo en *IyC*, junio de 2013.
El problema del radio del protón. Jan Bernauer y Randolf Pohl en *IyC*, abril de 2014.

METEOROLOGÍA

Invocar la lluvia



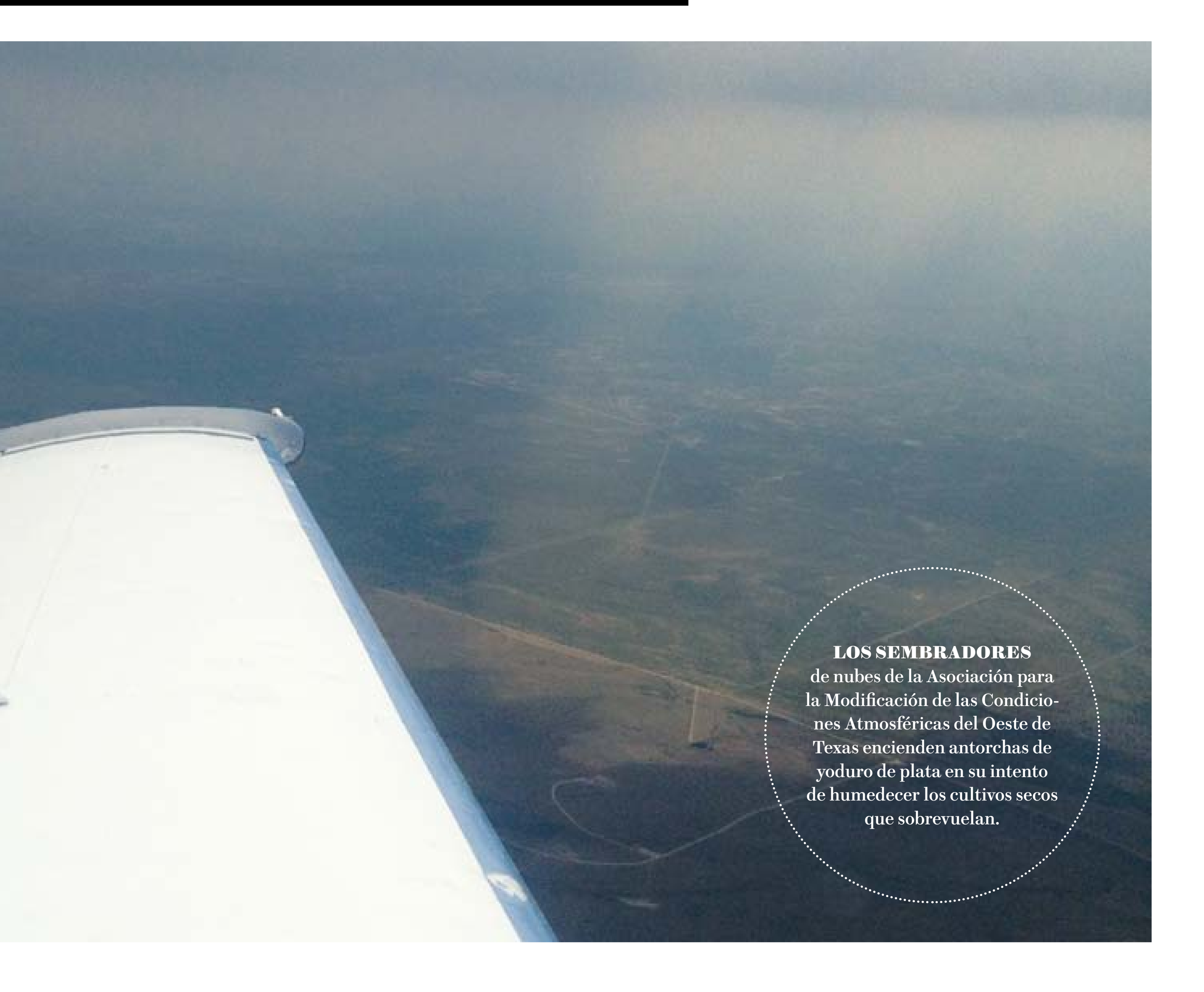
LAS NUBES ALBERGAN EN SU INTERIOR UNA CANTIDAD DE AGUA DESCOMUNAL. El volumen de una nube de pequeño tamaño puede alcanzar los 750 kilómetros cúbicos. A razón de medio gramo de agua por metro cúbico, lo que inicialmente parece una delicada pelusa atmosférica se convierte en todo un lago flotante.

Pero pongámonos en el lugar del agricultor, que ve cómo las nubes sobrevuelan sus campos resecos cargadas con el agua suficiente para salvar la cosecha y librarlo de las deudas. Sin embargo, tales nubes solo dejan caer unas pocas gotas antes de esfumarse en el horizonte. Esa exasperante situación motiva que en todo el mundo se inviertan cada año millones de dólares para tratar de controlar la lluvia.

En Estados Unidos, está creciendo el deseo de exprimir más humedad del cielo, sobre todo este año, que viene siendo el cuarto consecutivo de sequías intensas. Desde 2010, en gran parte de las grandes llanuras y el suroeste del país, las precipitaciones han descendido entre uno y dos tercios, mientras que los precios del

Gobiernos y agricultores de todo el planeta invierten cada año millones de euros en el intento de controlar las condiciones meteorológicas. Los últimos avances científicos indican que su esfuerzo habría merecido la pena

Dan Baum



LOS SEMBRADORES de nubes de la Asociación para la Modificación de las Condiciones Atmosféricas del Oeste de Texas encienden antorchas de yoduro de plata en su intento de humedecer los cultivos secos que sobrevuelan.

maíz, el trigo y la soja han aumentado hasta un 25 por ciento. California, donde se cultiva gran parte de la fruta y la verdura de la nación, aún debe reponerse de los tres últimos años de sequía, que han dejado los embalses medio vacíos y han mermado de forma alarmante las acumulaciones de nieve. En febrero, el Servicio Meteorológico Nacional comunicó al estado que la posibilidad de recuperación en un futuro próximo era de uno en un millar. La falta de humedad llevó a los cultivadores de almendra a derribar sus árboles, y hasta el agua potable se vio amenazada.

Millones de personas en el planeta viven en condiciones de extrema sequía y 168 países han alcanzado ya cierto grado de desertificación. Australia ha padecido durante nueve años los estragos de la denominada Gran Sequía. Turquía también ha experimentado la peor de la década. Brasil, China y algunos países de Oriente Medio y el sur de Asia han sufrido drásticas restricciones de agua. Y si la Organización Mundial de Meteorología de las Naciones Unidas está en lo cierto, el cambio climático no hará más que empeorar la situación. A pesar de

que solo un 0,04 por ciento del agua dulce del planeta flota en la atmósfera en un momento dado, podríamos acceder a ella con ingenio y suerte.

Algunos visionarios realizan experimentos invadiendo la atmósfera con iones para extraer más humedad del cielo. Pero el principal método para obtener mayores precipitaciones consiste en «sembrar» las nubes, es decir, introducir en ellas sustancias químicas. En 2012, una docena de operadores en nueve estados de EE.UU. practicaron la siembra de nubes en más de 215.000 kilómetros cuadrados. Por su parte, el Gobierno chino despliega un «ejército meteorológico» constituido por 48.000 personas armadas con 50 aeroplanos, 7000 lanzacohetes y 7000 cañones con el fin de favorecer las lluvias.

El principio es muy sencillo. Las nubes con capacidad de producir lluvia contienen gotas de agua micrométricas que presentan temperaturas inferiores al punto de congelación. Sin embargo, no pueden formar hielo porque carecen de núcleos sobre los que puedan cristalizar, como partículas de polvo del tamaño adecuado. Las gotas son demasiado ligeras para contrarrestar las corrientes de aire ascendentes, que las mantienen flotando. No obstante, si se suministran los núcleos adecuados, las gotas coalescen y forman pequeñas bolitas de hielo. A medida que estas descienden por una atmósfera más cálida, se convierten en la ansiada lluvia. Bernard Vonnegut, científico atmosférico del Laboratorio de Investigación de General Electric en Schenectady, Nueva York, inventó la técnica en 1946, poco después de que su hermano Kurt fuera liberado de un campo de concentración alemán que más tarde inmortalizaría en la novela *Matadero cinco*.

En su pionera siembra de nubes, Vonnegut utilizó yoduro de plata, un compuesto cuya estructura molecular es idéntica a la de los cristales de hielo. En una nube fría, el compuesto engaña al agua para que se adhiera a su superficie. Y no solo funciona en la teoría, sino también en la práctica; los pilotos afirman que pueden observar cambios en las nubes conforme la sustancia penetra en ellas. Pero la pregunta que más ha girado en torno a la siembra de nubes durante medio siglo ha sido: ¿habría llovido igualmente sin haber intervenido?

Si predecir cómo se comporta una nube ya es de por sí difícil, determinar con exactitud cómo lo habría hecho en otras condiciones resulta imposible. No hace tanto tiempo, en 2003, el Consejo Nacional de Investigación de EE.UU. apuntaba en un informe que, si bien se ha demostrado que la siembra de una nube puede alterar su evolución y las precipitaciones asociadas a ella, todavía no se ha confirmado que tales modificaciones deriven en cambios verificables y repetibles en las lluvias, el granizo y la caída de nieve.

Sin embargo, diez años después de ese informe, una flota de nuevos satélites meteorológicos de la NASA, acompañada de una serie de avances en las técnicas de radar y el aumento exponencial de la capacidad computacional, han permitido a los científicos afirmar con considerable certeza que en las condiciones adecuadas, y dentro de unos límites, la siembra de nubes funciona.



Dan Baum ha trabajado como redactor para la revista *New Yorker*, ha colaborado con *The Wall Street Journal* y ha escrito artículos desde los cinco continentes.



PÁGINAS ANTERIORES Y PÁGINA SIGUIENTE: CORTESÍA DE FIL FILBURN, ASOCIACIÓN PARA LA MODIFICACIÓN DE LAS CONDICIONES ATMOSFÉRICAS DEL OESTE DE TEXAS; ESTA PÁGINA: BEN DEPP, REDUX PICTURES

ACOPIO DE PRUEBAS

«El agua es una cuestión que suscita pasiones. La sequía también», me comentó Roelof Bruintjes cuando lo visité en su despacho en el Centro Nacional de Investigación Atmosférica de EE.UU. (NCAR). Bruintjes, físico especializado en nubes, lleva décadas estudiando la modificación de las condiciones atmosféricas, pero solo ahora comienza a estar convencido de su utilidad.

Cuesta pensar en otra técnica cuyos fundamentos no hayan variado en setenta años. En la mayoría de las operaciones todavía se sigue introduciendo únicamente yoduro de plata en las nubes. Lo que sí ha cambiado, sobre todo en los últimos diez años, es el método utilizado para evaluar la eficacia de la estrategia. En la década de los ochenta aparecieron los radares Doppler, en particular una versión llamada 88D, que permitió determinar la concentración de agua en una nube. Se trata del instrumento responsable de las áreas de color verde que se observan en los

EN SÍNTESIS

La siembra de nubes constituye la actividad central de un sector valorado en millones de euros. Sin embargo, durante mucho tiempo ha sido casi imposible demostrar su eficacia.

Los nuevos datos obtenidos a partir de satélites y radares, así como unos modelos computacionales más potentes, han brindado credibilidad a la práctica de la siembra de nubes con yoduro de plata.

Mientras tanto, a medida que nos adaptamos a un planeta cada vez más cálido, siguen apareciendo nuevas y dudosas formas de controlar la meteorología, como la ionización atmosférica.



LA PÉRDIDA DE LA COSECHA de algodón es frecuente en el oeste de Texas, donde las precipitaciones acumuladas han alcanzado cotas tan bajas como 76 milímetros en las últimas temporadas.

partes meteorológicos de la televisión. Pero incluso esa información resulta imprecisa, señala Bruintjes. «Diez piedras de granizo pueden aparecer como mil gotas de lluvia.» Según él, entre los mayores avances logrados desde el año 2000 figura el radar de polarización dual, que emite señales de onda tanto en el eje x como en el y y consigue analizar las nubes con gran precisión. Este sistema permite determinar si se trata de granizo o lluvia, así como el tamaño y la forma de las gotas.

La mejora en la calidad de los datos vino unida a la mayor capacidad de los ordenadores para analizarlos y, más importante todavía, a la creación de modelos virtuales para detectar cómo se habrían comportado las nubes de no haber sido sembradas. En octubre de 2012, el NCAR encendió su superordenador Yellowstone, un gigante capaz de realizar $1,5 \times 10^{24}$ operaciones por segundo, una potencia 180 veces superior a la del superordenador Bluesky que el NCAR había inaugurado en 2002. Yellowstone permite a Bruintjes y sus colaboradores recopilar datos del mundo real procedentes del Servicio Meteorológico Nacional y de una flota de nuevos satélites de la NASA (todos ellos de baja resolución) y realizar una simulación numérica de las nubes mucho más fina. El ordenador puede dividir un área de hasta 40 kilómetros cuadrados en una malla cuyos nodos disten 90 metros y segmentar seis horas de datos en secciones de tiempo inferiores a un segundo. Esta granularidad proporciona lo que Bart Geerts, de la Universidad de Wyoming, considera la mejor representación de la atmósfera que hemos tenido nunca. Según él, el ordenador posee la suficiente potencia para simular una nube, introducir en ella núcleos virtuales de yoduro de plata y observar lo que sucede.

Hasta el año pasado, Bruintjes no se había mostrado tan categórico al respecto: «Existen pruebas contundentes de que en las condiciones adecuadas podemos aumentar la cantidad de lluvia entre un 10 y 15 por ciento».

CREYENTES FERVOROSOS

No es de extrañar que entre los más entusiastas de la siembra de nubes figuren los habitantes del oeste de Texas, dada la sequía casi perpetua que les afecta y los devastadores incendios que arrasan sus extensas praderas cada verano. Desde su fundación en 1997, la Asociación para la Modificación de las Condiciones Atmosféricas del Oeste de Texas ha estado al cargo de las operaciones para aumentar el volumen de precipitaciones en un área de unos 26.000 kilómetros cuadrados en el suroeste del estado, una zona que el verano pasado recibió la mitad de las lluvias que suelen caer en ella. La asociación no se dedica a la investigación como Bruintjes y Geerts; recibe financiación para hacer que el agua llegue al suelo.

La ciudad de San Angelo y los distritos de conservación de agua de siete condados desembolsan 359.000 dólares al año para apoyar la labor de la asociación, basada en parte en la fe y en parte en los datos, con el fin de exprimirle un poco más de humedad a un cielo inmenso que se niega a producir lluvia. En otras palabras, Texas y los agricultores y rancheros afectados se gastan en total 4,4 céntimos de dólar al año por cada 4000 metros cuadrados de terreno con la esperanza de humedecer sus campos. Los agricultores de secano quieren que la lluvia caiga directamente sobre sus cosechas. Por su parte, los regantes y los municipios desean recargar los acuíferos que yacen bajo la costra superficial del suelo. Su dinero se destina a la adquisición de aeroplanos monomotor, la contratación a tiempo parcial de pilotos militares retirados a 75 dólares la hora y el alquiler de un despacho en un extremo del aeropuerto de San Angelo, un recinto castigado por el sol. También se contrata a jornada completa a un meteorólogo, Jonathan Jennings, con quien me reuní en su austero despacho del aeropuerto. Desde allí observa la pantalla de un ordenador que le suministra las veinticuatro horas del día los datos del programa Análisis de Seguimiento e Identificación de Tormentas y Previsiones a muy Corto Plazo (TITAN) del NCAR.

A mis ojos, el cielo parecía estar despejado por completo, pero Jennings mostraba interés en un par de pequeñas sombras grises que había detectado en unas imágenes de radar sobre el condado de Crockett; a su juicio, parecían prometedoras. Frente al despacho se hallaba uno de sus aviones, un Piper Comanche corriente, un modelo de ala baja de cuatro asientos que es el favorito de los sembradores de nubes, ya que su fuselaje posee la suficiente robustez como para resistir el vuelo en las vecindades de una tormenta. De los extremos y los bordes de salida de sus alas sobresalían unos tubos blancos con el extremo superior rojo, de unos 30 centímetros de longitud y unos 2,5 centímetros de diámetro: las antorchas que inyectan el yoduro de plata en las nubes. Cada una contenía Gilsonita, un tipo de asfalto inflamable, mezclado con 5,2 gramos de yoduro de plata. Cuando un piloto enciende una, la antorcha arde y su combustión transforma el yoduro, que se extiende en una estela de humo que el avión deja tras de sí.

Cada mañana, sobre las siete, Jennings envía un correo electrónico a los miembros y los pilotos de su equipo con una previsión meteorológica que estima las probabilidades de que se lleven a cabo lo que él llama «operaciones». Después se dedica a sus asuntos particulares pero sin perder de vista su teléfono inteligente, donde presta atención a los mapas meteorológicos. Sobre las dos del mediodía suele saber si van a realizarse operaciones de siembra y llama a los pilotos para exponerles la situación. «En caso de tener que volar, necesitamos que estén en el aire treinta minutos después de la llamada.»

Cómo hacer que llueva

Las nubes producen lluvia cuando las diminutas gotas de agua sobreenfriada que contienen colisionan con partículas de polvo del tamaño adecuado. Entones se forman bolitas de hielo que se precipitan hacia el suelo y se funden a medida que caen. La técnica más extendida para generar lluvia consiste en introducir en las nubes partículas de yoduro de plata, o «semillas», sobre las que cristaliza el hielo. No obstante, continuamente aparecen nuevos y dudosos métodos para aumentar las precipitaciones.

NUBE SOBREENFRIADA

2 El yoduro de plata proporciona los núcleos sobre los que puede formarse el hielo

0 °C

FLUJO DE AIRE

CORRIENTE ASCENDENTE

3 Los cristales de hielo se funden conforme caen en forma de lluvia

YODURO DE PLATA

1 Normalmente unas antorchas dispuestas en las alas de los aviones liberan el yoduro de plata, que se incorpora a una corriente ascendente de aire. En otras ocasiones, el yoduro se lanza desde el suelo mediante generadores, cañones o cohetes

LLUVIA

Generador terrestre de yoduro de plata

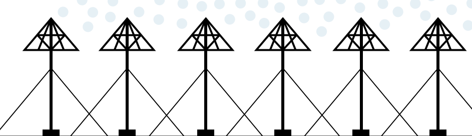
Cañón antiaéreo con proyectiles que contienen yoduro de plata

Otro método: Generación de iones

Una serie de torres electrificadas envían partículas ionizadas al cielo para sembrar pequeñas gotas de agua. Ninguno de los científicos entrevistados en el presente artículo parece tener mucha fe en el método, pero, aun así, los proyectos de generación de iones siguen adelante en Abu Dabi y otros países.

2 Las partículas cargadas se adhieren a los núcleos de condensación y facilitan la formación de gotas de agua

1 Las torres generan partículas dotadas de carga negativa



Iones con carga negativa

LLUVIA

Sistema de torres ionizadoras

JOHN GRIMWADE

Una vez que los pilotos se han puesto en marcha, todo ocurre con rapidez. Jennings observa su ordenador y hace las veces de controlador aéreo. «Mi tarea consiste en hacer que se aproximen hasta la parte más favorable de la tormenta», comenta. Esta corresponde al flujo de entrada, la corriente ascendente de aire caliente y húmedo que penetra en la tormenta y hace de combustible. «La mayoría de mis pilotos poseen la suficiente experiencia como para saber dónde se ubica el flujo de entrada.» En ocasiones incluso puede llegar a verse, en forma de remolinos de humedad fantasmales que ascienden rápidamente hacia el cielo. Los pilotos se dirigen hacia ese punto, ya que no pueden volar en el interior de la nube. La cizalladura del viento podría romper el avión en pedazos y, por otra parte, la Administración Federal de Aviación prohíbe volar dentro de las nubes de tormenta. Además, se evita volar por encima de las nubes porque hacerlo conlleva tres desventajas: la ascensión consume una gran cantidad de combustible; las turbulencias a esa altura son muy violentas; y el compuesto químico no se descarga en la zona de suministro más eficiente, es decir, el flujo de entrada.

«Existen pruebas contundentes de que en las condiciones adecuadas podemos aumentar el porcentaje de lluvia entre un 10 y un 15 por ciento.» Roelof Bruintjes, experto en física atmosférica

En su lugar, el piloto de Jennings vuela en círculos alrededor del lugar óptimo, enciende todas las antorchas que considera necesarias y deja que el flujo de entrada transporte hacia la nube el humo cargado de plata. En ocasiones basta con hacerlo una sola vez, pero en otras se realizan hasta cincuenta intentos. Se invierten de unos diez a quince minutos en revestir de plata una nube. «El agua sobreenfriada se localiza a unos 600 metros en el interior de la nube», explicaba Jennings. El flujo de entrada transporta el yoduro de plata hasta la altura precisa donde se necesita y allí comienzan a formarse los primeros cristales de hielo. Una vez se ha desencadenado la reacción, la nube comienza a generar cristales de hielo de forma espontánea. A continuación, comienzan a colisionar entre ellos y a fracturarse. Un cristal de hielo fracturado puede capturar más agua y arrastrarla con él hacia el suelo.

Jennings está experimentando con un nuevo tipo de antorcha que utiliza cloruro de calcio, en lugar de yoduro de plata. La nueva sal no plantea problemas ambientales, es más barata que el yoduro de plata (cuyo precio está vinculado al precio de la plata minada, que actualmente alcanza cotas astronómicas) y también funciona en nubes cálidas y en condiciones de menor humedad relativa. Además, según Jennings, algunas nubes parecen responder mejor al cloruro de calcio. En las pocas ocasiones en que sus pilotos han utilizado ambos compuestos, ha caído tanta lluvia que era como si hubieran «rajado con un cuchillo la parte inferior de la nube», describía. Para él, no hay nada místico al respecto. No necesita realizar mediciones a largo plazo ni comparaciones con lo que podría haber sucedido sin la acción de sus pilotos. Simplemente comprueba que las nubes responden a su trabajo.

En su ordenador me mostraba las imágenes de radar del pasado 28 de abril. Dentro de unas manchas grises parpadeaban una serie de puntos amarillos y rosas, es decir, la lluvia. «Cuando vi esta imagen, envié los aviones.» Observamos la trayectoria de los aeroplanos conforme surcaban la pantalla. Unos minutos después de que hubieran alcanzado sus objetivos, los puntos amarillos y rosas aumentaron descomunalmente de tamaño y dibujaron una línea alargada de color. Jennings me explicó que la siembra no solo genera gotas de lluvia; también puede hacer que la nubes asciendan a lo largo de una gran estructura vertical que las vuelve «más fuertes», es decir, con mayor capacidad de generar lluvia. «Creamos una línea de turbonada de mesoescala, un área de convergencia de tormentas muy intensa», explicaba. «El proceso vigoriza el impulso ascendente, lo que a su vez produce más lluvia.» Yo respondí que habría ocurrido igualmente, sin haber sembrado las nubes. Pero él ya tenía la respuesta preparada: «Las previsiones no anunciaban lluvias sobre la ciudad de Sonora esa noche. Sin embargo, cayeron 38 milímetros».

Las nubes sobre Vail, la estación de esquí de Colorado, se siembran desde 1975. La Consultora Meteorológica del Oeste de EE.UU., un contratista privado, controla 22 generadores de yoduro de plata instalados en la cima de montañas situadas en una circunferencia de 50 kilómetros alrededor de la estación. Si se cumplen las condiciones adecuadas, los generadores, mucho más baratos y fáciles de manejar que los aviones, se activan para quemar acetona impregnada en yoduro de plata. El humo asciende hasta las nubes y, según la compañía, cae un 35 por ciento más de nieve sobre las laderas que sobre el área no intervenida. «Los datos de Vail revelan que la siembra de nubes destinada a la generación de nieve cuesta solo un 5 por ciento de los gastos que supone la producción artificial de nieve», me comentó Larry Hjermstad, de dicha consultora. Además de los generadores de Vail, su compañía ha dirigido más de 50 operaciones a lo largo de la divisoria continental, ofreciendo sus servicios a estaciones de esquí, municipios y estados situados en la cuenca del río Colorado. Hjermstad añadió que la sequía regional que comenzó hace tres años ha despertado el interés por la siembra de nubes. Con el agravante del cambio climático y el aumento de población en el oeste del país, se la puede considerar una solución a largo plazo para un problema recurrente.

UNA HISTORIA DUDOSA

El sinnúmero de charlatanes que han intentado exprimir tanto la lluvia de las nubes como el bolsillo de los más incautos le ha hecho un flaco favor a la reputación de la siembra de nubes. Tal y como James Rodger Fleming, de la Universidad Colby, resume en su desternillante libro, *Fixing the sky: The checkered history of weather and climate control* («Arreglar el cielo: La agitada historia del control del tiempo y el clima»), publicado en 2010, la literatura está repleta de modificadores de las condiciones meteorológicas, desde la Biblia hasta Julio Verne e incluso el mismo Kurt Vonnegut. Los verdaderos esfuerzos «científicos» para generar lluvia se remontan a mediados del siglo XIX y las estrategias para forzar las precipitaciones abarcaban desde

cañonazos hasta incendios forestales. En 1894, los habitantes de Nebraska trataron de poner fin a una terrible sequía prendiendo ocho barriles de pólvora en el parque de atracciones de Hastings. Como muestra de lo dudoso de la técnica, lloviznó ligeramente, no lo suficiente como para mejorar la situación pero sí lo bastante como para alentar a la población a seguir intentándolo.

El entorno científico del Gobierno federal solía mostrar una fe devota en la siembra de nubes. La Fundación Nacional para la Ciencia y la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) financiaron con generosidad experimentos durante cuarenta años a pesar de las vicisitudes a las que tuvo que enfrentarse la técnica. En 1962 el Gobierno inauguró el proyecto Stormfury para atenuar la intensidad de los huracanes mediante la siembra de estos. Un año más tarde, el huracán Flora, de categoría 4, quitó la vida a miles de personas en Cuba, y Fidel Castro, todavía afectado por la crisis de los misiles del año anterior, acusó a EE.UU. de haber manipulado la tormenta. Aun así, el Gobierno siguió adelante con el proyecto Stormfury durante dos décadas más, antes de reconocer que la siembra no influía en el comportamiento de los huracanes.

A lo largo de la década de los sesenta se hizo acopio de suficientes datos como para mantener la creencia de que quizá la siembra de nubes sí incrementaba las precipitaciones. EE.UU. incluso la utilizó como arma en la guerra de Vietnam. Desde 1967 hasta 1972, las fuerzas aéreas sembraron nubes sobre Laos con la esperanza de ralentizar el transporte de hombres y material desde el norte de Vietnam hasta Ho Chi Minh; la lluvia pareció aumentar en un 30 por ciento. Aunque nunca quedó claro por qué derramar agua de lluvia sobre el enemigo era más ofensivo que lanzar napalm o bombas explosivas, el destape de la Operación Motorpool en 1973 consternó a la nación y al mundo entero. La siembra de nubes comenzaba a teñirse de connotaciones malévolas y, hacia 1977, se obligó a EE.UU. a firmar un tratado internacional que prohibía la manipulación de las condiciones atmosféricas con fines militares.

La técnica puede resultar contenciosa desde otros puntos de vista. El 9 de junio de 1972, mientras se llevaba a cabo un prolongado experimento de siembra en Dakota del Sur, una súbita inundación causó la muerte de 256 personas en Rapid City; en el consiguiente juicio, los sembradores de nubes quedaron en la extraña posición de tener que argumentar, básicamente, que sus operaciones no eran eficaces. El caso fue desestimado alegando un tecnicismo jurídico antes de que el jurado determinara causalidad. Desde esa catástrofe, los agricultores se han quejado de que la siembra había interferido con el agua que habría caído sobre sus cultivos si no se hubieran manipulado las nubes; y las inundaciones menores también se han achacado a esa práctica. La eficacia de la técnica nunca ha sido reconocida, pero los incidentes recurrentes han empañado su imagen.

Por otro lado, la siembra de nubes ha tenido que enfrentarse contra todos aquellos que sostienen que el proceso interfiere en el plan de Dios; contra los que ven en ella una trama capitalista para privatizar el tiempo meteorológico; y contra los que están convencidos de que la siembra de nubes, la fumigación de cosechas y hasta las estelas de condensación que dejan los aviones de pasajeros forman parte de una «diabólica operación genocida de rociado de aerosoles en forma de estelas químicas» dirigida por el Gobierno. La página web AboveTopSecret.com describe la manera en que «la siembra de nubes nos aniquilará a todos».

Parte de la paranoia guarda relación con el hecho de que, efectivamente, el yoduro de plata, sustancia utilizada en el revelado fotográfico, es tóxica y resulta especialmente nociva para los peces. Así que el vertido del compuesto en la atmósfera no solo preocupa a los que contemplan una teoría de la conspiración. Desde los años setenta, los principales grupos de defensa ambiental llevan cuestionando la seguridad de la siembra de nubes, especialmente a tenor de su dudosa eficacia. El biólogo Francis Mangels, antes en el Servicio Forestal de EE.UU. en el Bosque Nacional de Shasta-Trinity, California, ha luchado durante años contra la técnica. «El yoduro de plata es nocivo para los insectos acuáticos», declaró a un periodista en 2010. «Nunca se ha demostrado de forma apropiada la utilidad de la siembra de nubes; fracasa en el 95 por ciento de las veces y es tóxica. ¿Falta añadir algo más?»

Quizá sí. Lo cierto es que, a pesar de su toxicidad, el yoduro de plata se aplica en cantidades tan insignificantes que resulta imposible detectarlas en el ambiente. El tipo de nubes que se siembran suelen contener entre 10.000 y 30.000 kilotoneladas de agua, así que los irrisorios 40 gramos de yoduro de plata que se introducen en una aplicación corriente son infinitesimales. En conjunto, la siembra de nubes anual en todo el mundo representa el 0,1 por ciento de la cantidad incorporada a la atmósfera por las actividades humanas en EE.UU. La industria de la siembra de nubes sigue esgrimiendo que el yoduro de plata que utiliza no puede detectarse por encima de las concentraciones de referencia en suelos o en aguas subterráneas y que no supone ninguna amenaza ni para los humanos ni los peces. Aun así, no cabe esperar que la polémica desaparezca en un futuro próximo.

«La consideramos una solución a largo plazo para un problema recurrente.» Larry Hjermstad, consultor meteorológico

Se cree que la intensa controversia y la incertidumbre de los resultados hizo que en la década de los ochenta el Gobierno federal perdiera el interés por la investigación sobre la modificación de las condiciones atmosféricas. Bill Woodley, meteorólogo retirado que hoy forma parte del comité editorial de la revista especializada *Journal of Weather Modification*, recuerda haber realizado en los setenta un prometedor experimento de siembra de nubes en Florida al que se retiró la financiación de la noche a la mañana. A pesar de que él y sus colaboradores parecían haber hecho aumentar la lluvia en un 15 por ciento en un área de 13.000 kilómetros cuadrados, sus resultados fueron inferiores a los previstos. «Algunos dijeron en los medios que había sido un fracaso. Nosotros defendimos que habíamos aprendido mucho y solicitamos financiación para realizar una fase de confirmación», pero la NOAA cerró el grifo, aseguró Woodley. «Se afirmaba que si el resultado no era obvio ni demostrable, no había por qué lamentarse.»

Para los científicos, unos datos prometedores pero dudosos suponen una razón para investigar más, no menos. «Un cien-

tífico sensato sostendría que la siembra de nubes funciona en determinadas condiciones y se preguntaría con qué frecuencia se cumplen dichas condiciones en zonas donde tiene sentido invertir dinero» comentaba Dan Breed, otro meteorólogo del NCAR. Sin embargo, para los cargos públicos que deben tomar decisiones en materia de financiación en un entorno político de alta tensión, los datos contradictorios han supuesto una excusa para retirarse de una empresa cada vez más polémica. «Llegó un punto en que el Gobierno federal decidió que no valía la pena continuar y retiró la financiación por completo» a comienzos de la década de los ochenta, según declaraba Joseph Golden, que dirigió en su momento el ahora desaparecido Programa de Modificación Atmosférica de la NOAA y que hoy trabaja en la Asociación para la Modificación de las Condiciones Atmosféricas, con base en Utah, un consorcio de 18 proyectos de siembra de nubes en el oeste de EE.UU. Cuando me encontré con él por primera vez, en Boulder, Colorado, estaba dispuesto a hablar durante horas sobre la irresponsabilidad de los centros federales de investigación. «Hace falta contar con un evaluador neutral [de los datos]. Esa función la debería desempeñar el Gobierno. Pero no existe una presencia federal que apoye las investigaciones porque son controvertidas.» Así que durante los últimos veinte años, los que han investigado la modificación de las condiciones atmosféricas en EE.UU. lo han hecho sin financiación federal.

Aquellos que siguen de cerca a China y saben que sus operaciones están superando a las de EE.UU. pueden añadir a la lista más razones para apoyar públicamente la siembra de nubes. El ejército meteorológico del Gobierno chino tiene como objetivo exprimirle al cielo entre un 3 y 5 por ciento más de lluvia a lo largo de la presente década. El país afirma haber generado casi medio billón de toneladas de lluvia que no hubieran caído de no ser por las operaciones. Tailandia lleva sembrando nubes desde la década de los sesenta mediante un método patentado por el propio rey Bhumibol Adulyadej llamado «supersándwich», cuyo nombre hace referencia a que se siembra simultáneamente una nube cálida y otra fría que flotan a distinta altura. (Sin embargo, es difícil hallar información fiable sobre la eficacia de la técnica, ya que en Tailandia se considera un crimen hacer cualquier comentario negativo sobre el rey.)

El presente año, Malasia llevó a cabo una siembra masiva de nubes para generar una lluvia que parece haber caído también sobre su vecino, Singapur. También este mismo año, Indonesia, que hace dos años había experimentado con esta técnica para dispersar la niebla en incendios forestales, la ha empleado para desviar lluvias torrenciales de Yakarta. Rusia cree firmemente en la siembra de nubes y la utilizó para eliminar partículas radiactivas suspendidas en el aire tras el accidente nuclear de Chernóbil en 1986. Un total de cincuenta países la aplican, la mayoría de ellos con ayuda de Bruintjes y sus colaboradores del NCAR.

SACAR PARTIDO A LAS NUBES

Los aeroplanos, por no hablar de los lanzacohetes y los cañones antiaéreos, son instrumentos un tanto burdos. Su manejo y mantenimiento elevan los costes y, además, contaminan. Visto así, el proceso de siembra de nubes puede parecer más propio del siglo xx. No es de extrañar que los científicos busquen métodos más limpios y avanzados. La última tendencia consiste en ionizar la atmósfera; en el laboratorio, llenar el aire de partículas dotadas de carga eléctrica provoca que la humedad condense y caiga. Un proyecto de Abu Dabi ha desplegado sobre el terreno un sistema de antenas que asemejan las varillas de paraguas gigantes y, según se asegura, se están obteniendo resultados, igual que en otros proyectos llevados a cabo en Australia. Sin embargo, ningún científico entrevistado en este artículo manifiesta tener una gran fe ni en la teoría ni en la práctica de obtener lluvia a partir de la ionización de la atmósfera. Es más, Bruintjes se aventura a tildarla de «fraude». Incluso uno de los primeros científicos en experimentar con dicha técnica, Arquímedes Ruiz-Columbié, quien a comienzos del presente siglo dirigió un experimento en Laredo, Texas, para generar lluvia con una antena de ionización del tamaño de una carpa de circo, no observó indicios de que funcionara.

Ruiz-Columbié es profesor en la Universidad Tecnológica de Texas y trabaja con Jennings en el proyecto de siembra de nubes de San Angelo. Mientras conversaba con Jennings, entró de repente en el despacho y me aseguró que, pese a lo que hubiera podido llegar a mis oídos, su experimento de ionización no había sido ningún fracaso. Simplemente había dado resultados distintos a los anunciados. «Es verdad que no hallamos pruebas de un incremento en las lluvias», afirmó. «Pero sí detectamos que, a sotavento de las antenas, la concentración de aerosoles [partículas suspendidas en el aire] había disminuido. Se aglomeraban y caían al suelo. Así que la ionización limpia el ambiente.» Respecto a los experimentos de generación de lluvia de Abu Dabi y Australia, Ruiz-Columbié se mostraba muy escéptico. «Pero tengo la mente abierta», apuntaba. «Hay que ver los datos.»

Jennings me explicaba que el meticuloso conjunto de datos de Ruiz-Columbié, así como sus modelos matemáticos del comportamiento de las nubes, ha demostrado la validez de la siembra de nubes. Ambos me mostraron un análisis de las campañas llevadas a cabo durante diez años por su organización matriz, una asociación para la modificación de las condiciones atmosféricas que abarca 35 países. Las 3100 nubes sembradas en el estudio aumentaron de volumen y fueron más longevas que las nubes sin sembrar situadas fuera del área escogida como objetivo; descargaron un total de 4200 millones de metros cúbicos de agua, casi un 12 por ciento más que las nubes sin sembrar.

«Hay un aspecto que debe entenderse bien porque en él reside el quid de la cuestión», señaló Ruiz-Columbié mientras se inclinaba hacia delante y estiraba un dedo. «No podemos "hacer" que llueva. Si no hay nubes en el cielo o las que hay no son las adecuadas, no podemos crear algo a partir de la nada. Lo que hacemos es "favorecer" las precipitaciones.»

«Así es», corroboró Jennings. «Imagina que sacas una esponja de un cubo de agua. Puedes sostenerla y dejar que escurra. O puedes exprimirla, que es lo que hacemos nosotros.»

PARA SABER MÁS

Taming the sky. Jane Qiu y Daniel Cressey en *Nature*, vol. 453, págs. 970-974, junio de 2008.

Fixing the sky: The checkered history of weather and climate control. James Rodger Fleming. Columbia University Press, 2010.

EN NUESTRO ARCHIVO

Las nubes. J. P. Chalon y M. Gillet en *La atmósfera*, colección *Temas* de *IyC* n.º 12, 1998.

ECONOMÍA

La economía de Ponzi



Numerosas prácticas financieras y empresariales semejan una estafa piramidal clásica

Kaushik Basu

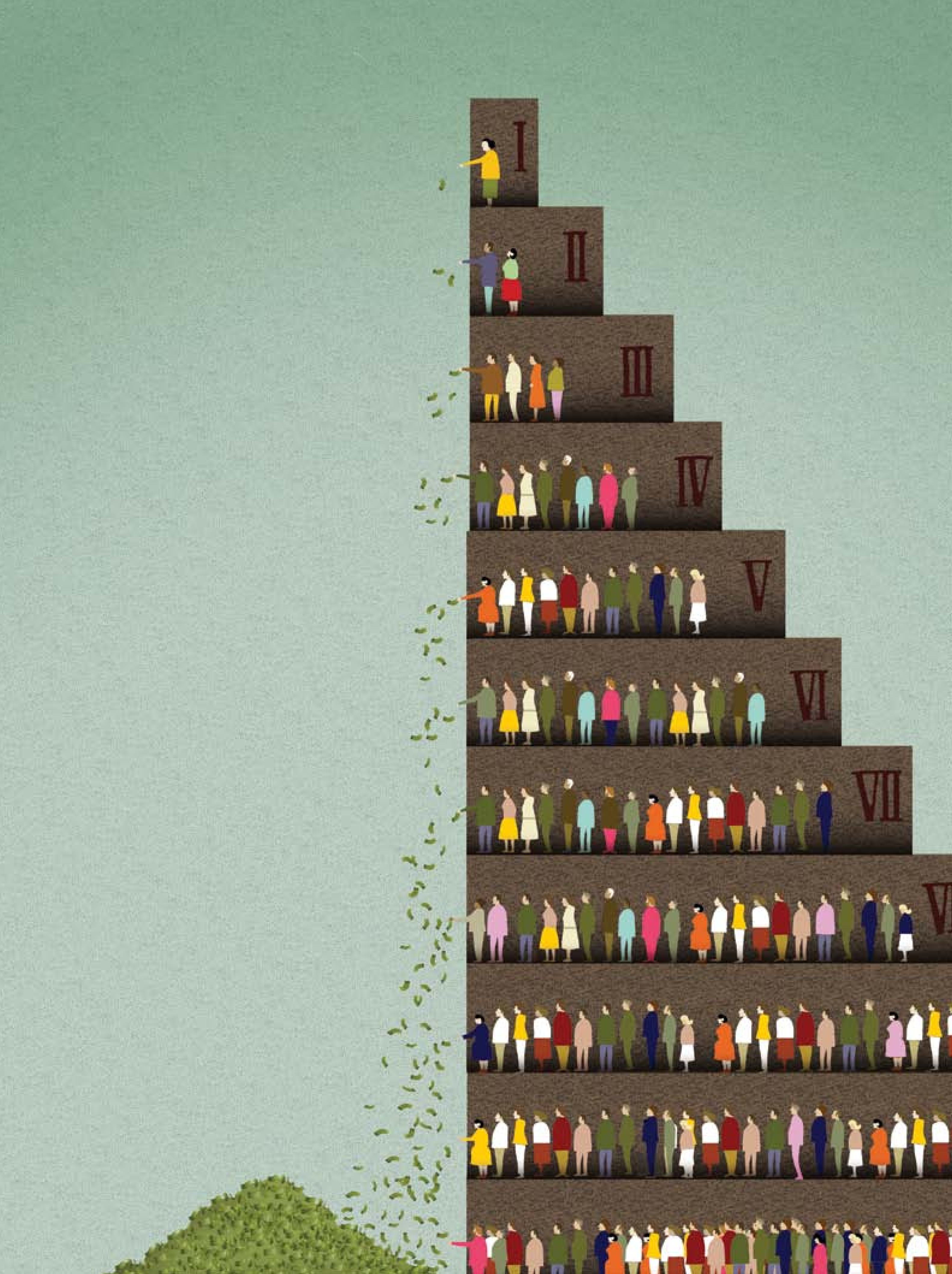
ISTOCKPHOTO (*gráficos decorativos*); ADAM SIMPSON (*ilustración*)

EN SÍNTESIS

Los esquemas de Ponzi (las estafas piramidales clásicas del tipo «robar a Pedro para pagar a Pablo») probablemente hayan sido una constante en la actividad económica desde, al menos, el siglo XIX.

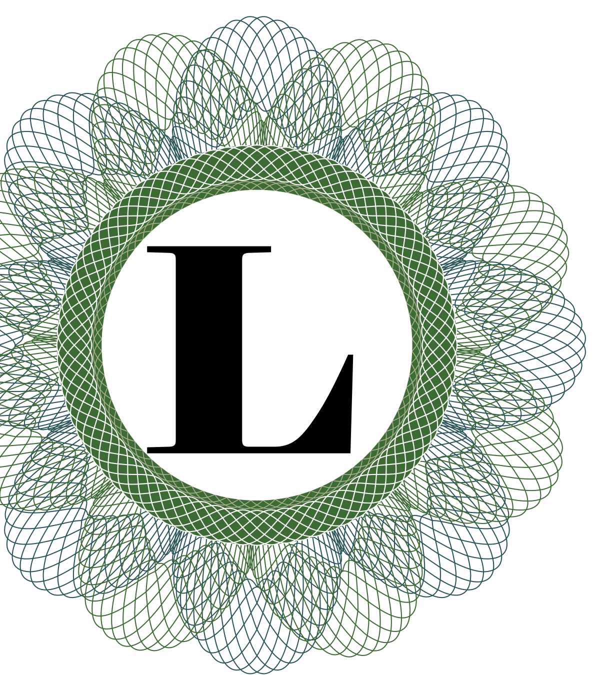
Un análisis cuidadoso revela que, en las economías modernas, los esquemas de Ponzi son más comunes de lo que se pensaba. En ocasiones surgen de manera espontánea, sin necesidad de un estafador.

Las burbujas financieras y numerosas prácticas empresariales comparten características con los esquemas de Ponzi. Su conexión con prácticas legítimas dificulta sobremanera su regulación.


I
II
III
IV
V
VI
VII



Kaushik Basu es vicepresidente y economista jefe del Banco Mundial y profesor de economía en la Universidad Cornell. Además de su trabajo sobre los esquemas de Ponzi, ha llevado a cabo investigaciones de gran alcance en numerosos campos, como el derecho y la economía de la corrupción.



as estafas de Ponzi han sido un elemento recurrente en la vida económica de las naciones ricas y pobres desde, al menos, el siglo xix. A pesar de tratarse de un timo que ha arruinado la vida de millones de personas, la mayor parte de la gente apenas tiene una vaga idea de cómo funciona. Ello tal vez explique por qué tantas personas continúan cayendo víctimas de su extraño y casi místico encanto. La cuestión ha cobrado cierta importancia en tiempo reciente a raíz de la crisis financiera mundial y de los titulares sobre la mayor estafa de Ponzi de la historia: el escándalo de Bernard Madoff, que estalló en el punto álgido de la debacle.

Cualquiera que haya seguido la debacle de Madoff habrá pensado que toda estafa de Ponzi constituye un fraude perpetrado deliberadamente. En lugar de emplear el dinero de los inversores para financiar un negocio productivo, el estafador lo usa para pagar los intereses de los inversores anteriores. Sin embargo, los economistas han comenzado a percatarse de que ese comportamiento puede también surgir de forma espontánea e incluso inconsciente. La razón se debe a que las expectativas se alimentan en cascada, lo que genera un frenesí especulativo que infla una burbuja condenada a explotar tarde o temprano.

Los expertos en mercados financieros y economía conductual han llegado a la conclusión de que la táctica de Ponzi bien podría ser endémica al flujo y reflujo de los mercados financieros globales: como si se tratara de un fenómeno natural que, al igual que las mareas o a los eclipses, no necesita ningún villano como Madoff para desencadenarse.

El esquema de Ponzi puede disfrazarse de múltiples maneras. Ello hace difícil detectarlo, aislarlo y regularlo con una normativa legal clara. Mi investigación se ha centrado en ciertas operaciones intrincadas que una empresa puede llevar a cabo para mantenerse a flote, al menos durante un tiempo. «Esquemas de Ponzi camuflados» que, aunque no quebrantan ninguna ley, pueden causar estragos.

El creciente interés por los esquemas de Ponzi no solo obedece a titulares sensacionalistas. Varios estudios han revelado que el fenómeno puede explicarse, por un lado, mediante un análisis científico que extraiga su estructura matemática subyacente, y, por otro, a partir de la psicología del timador, que apela a nuestra ingenuidad innata. Se trata de una investigación importante por cuanto suscita la esperanza de detectar a tiempo productos financieros tóxicos antes de que miles de personas sucumban y acaben arruinadas y víctimas de una profunda angustia.

LA ESTAFA BÁSICA

El esquema de Ponzi es en realidad más antiguo que el propio Carlo Ponzi (1882-1949). Aunque el célebre estafador es conocido por los timos que perpetró en Nueva Inglaterra en 1920, su manera de proceder probablemente fuese común ya antes. Así lo ilustran los personajes sin escrúpulos de Charles Dickens, cuyas obras reflejan las estafas financieras del Londres victoriano. De hecho, las acciones del tipo «robar a Pedro para pagar a Pablo» seguramente hayan existido desde que los humanos crearon sus primeros asentamientos. Como tan bien demostrara Madoff, el timo de Ponzi básico proporciona una manera de hacerse rico de la noche a la mañana. Y, con una pizca de mercadotecnia, permite llegar muy alto... hasta que todo el ardid se derrumba.

En el fraude clásico, el estafador persuade a alguien de que invierta 100 dólares a cambio de unos espectaculares beneficios mensuales del 10 por ciento. El mes siguiente, otras dos personas invertirán 100 dólares cada una, el inversor original recibirá 10 dólares y el «empresario» guardará 190 para sí. De esta manera, si se comienza con 100 dólares y la pirámide de inversores se duplica cada mes, los ingresos en el décimo mes ascenderán a 46.090 dólares. El problema reside en que no hay ninguna manera elegante de detener el proceso. Cuando dejen de aparecer nuevos inversores, todo se derrumbará.

La razón por la cual una estafa de Ponzi puede resultar tan convincente se debe a que no existe ningún punto bien definido en el que se produzca la quiebra. Si hubiera un momento de implosión determinado, el fraude no sería tan pernicioso, ya que nadie invertiría un mes antes del hundimiento. Sabiendo esto, tampoco nadie lo haría dos meses antes, y así sucesivamente. De acuerdo con esta lógica implacable, conocida como inducción inversa, sería poco probable que la estafa echase a andar.

La ausencia de un punto de implosión definido da lugar a un importante enigma psicológico. En última instancia, una estafa de Ponzi puede considerarse un fenómeno de locura colectiva. Sin embargo, para un individuo dado, participar en ella no es intrínsecamente irracional, pues la frágil estructura siempre puede tardar cierto tiempo en desmoronarse.

LA ESTAFA NATURAL

Las burbujas financieras son unas recién llegadas al variopinto mundo de las estafas de Ponzi. El reconocimiento de su condición de esquemas de Ponzi llegó cuando se hizo evidente que la psicología de un inversor no depende de que su dinero vaya a un agente inmobiliario, a un corredor de bolsa o a un charlatán. En todos los casos, es el aumento sostenido de las ganancias —o, mejor dicho, las expectativas de alza— lo que mantiene el proceso en marcha. Fue esta razón la que indujo al nóbel de economía Robert J. Shiller, investigador en Yale, a denominarlas «esquemas de Ponzi de ocurrencia natural»; es decir, burbujas que no están orquestadas por un manipulador, sino que surgen como consecuencia de las fuerzas naturales del mercado, donde las expectativas de una persona avivan las de la siguiente.

El fenómeno ha ocurrido numerosas veces en el mercado de la vivienda y, a lo largo de la historia, en el del oro. En tales casos, alguien desea adquirir un bien solo porque otros lo hacen, lo que contribuye a elevar los precios. Hace poco, el precio del oro se desplomó como consecuencia de un comportamiento de manada que cristalizó en un esquema de Ponzi natural. Entre 2009 y 2011, el valor del metal experimentó un fuerte ascenso, ya que los inversores pensaron que las inyecciones de liquidez de los bancos centrales harían que su precio siguiera subiendo. Ello condujo a muchas personas a canjear su dinero por oro a medida que el primero se depreciaba. Así, llegó una avalancha de fondos para aprovechar la expansión esperada del mercado y, en esos dos años, el precio de la onza subió de 900 a 1800 dólares. Sin embargo, en abril de 2013 se produjo una pequeña corrección, la cual desató el pánico entre los inversores. Estos vendieron en masa e hicieron que todo desembocase en un gigantesco crac: en apenas dos días, y para desconcierto de especuladores y analistas, el precio del oro se desplomó más de lo que lo había hecho en las tres décadas precedentes.

Al igual que un esquema de Ponzi puede gestarse de manera espontánea, también resulta posible orquestar una burbuja de modo que parezca natural. Uno de los casos más famosos sucedió a principios del siglo XVIII, cuando John Law, de la Compañía del Mississippi francesa, empezó a distribuir reembolsos inflados a partir de las ganancias de las empresas radicadas en la colonia francesa de Luisiana. La estafa atrajo cada vez a más inversores, hasta que una gran demanda de fondos a un banco afiliado a la compañía de Law hundió el elaborado engaño.

FRAUDES OCULTOS

Algunas transacciones financieras de apariencia benévola pueden revelarse como un esquema piramidal «camuflado». Se trata de procedimientos perfectamente legales que, a menudo, surgen cuando las empresas intentan mantenerse a flote en tiempos difíciles.

Un esquema de Ponzi encubierto plantea todo tipo de desafíos para los reguladores, ya que aparece entrelazado con actividades legítimas. Una regulación excesivamente dura que los extirpe sin más puede dañar el tejido sano circundante; sin embargo, dejarlos sin control conlleva el riesgo de que crezcan y se transformen en un tumor maligno. Por si fuera poco, tales esquemas piramidales camuflados pueden adoptar formas muy diversas.

Un ejemplo ocurre cuando empresas y Gobiernos se permiten recurrir a ciertos malabarismos de refinanciación que, por sí mismos, no resultan dañinos. Una compañía puede no querer liquidar parte de un activo, lo que tal vez acarree altos costes de pago a



Carlo Ponzi

Ayudante especial del alcaide

Carlo Pietro Giovanni Guglielmo Tebaldo Ponzi nació el 3 de marzo de 1882 en Lugo, Italia. Tras despilfarrar unos cuantos años en una universidad en Roma, lo que calificó como «unas vacaciones pagadas», emigró a los EE.UU. y se asentó en Boston a finales de 1903. Su falta de escrúpulos y su gran inteligencia se hicieron evidentes muy pronto: la primera, cuando fue a parar a una cárcel canadiense por falsificar una firma; la segunda, cuando escribió a su amada madre desde prisión explicándole que su nueva dirección se debía a su maravilloso trabajo como «ayudante especial del alcaide».

Una vez cumplida la condena, de regreso en Boston, Ponzi comenzó a idear procedimientos ingeniosos para atraer a las vulnerables clases medias y darle al fraude financiero un perfil alto. La quiebra de uno de sus grandes negocios no solo arruinó a numerosas familias, sino que se llevó por delante seis bancos de Boston. Tras repetidas estancias en prisión, fue finalmente deportado a Italia, desde donde emigró a Brasil. Casi ciego y con el ánimo y la salud quebrantados, murió en Río de Janeiro el 18 de enero de 1949 sumido en la pobreza.

GETTY IMAGES

un prestamista. Así que el prestatario (ya se trate de un individuo, una empresa o un país) solicita un crédito a otro agente para pagar al primero. Pero si, al hacerlo, su capacidad para devolver el dinero disminuye, o algún beneficio esperado no se materializa, esos tejemanejes pueden precipitar una quiebra.

La crisis de deuda que sufrió Perú a principios de los años ochenta del pasado siglo, en la que el Gobierno pidió nuevos préstamos para pagar los preexistentes, ha sido considerada por algunos economistas como un ejemplo tales malabarismos. Aunque el Gobierno peruano pensaba que la economía mejoraría y que podría devolver los intereses y el capital, esas expectativas nunca se materializaron. Sus esperanzas se vieron frustradas por un gran terremoto, un posterior descenso de las exportaciones de patata y azúcar, y una crisis de deuda generalizada en América Latina, todo lo cual se tradujo en una caída del producto interior bruto.

Por otro lado, numerosas actividades empresariales legítimas pueden camuflar un esquema de Ponzi. Considere lo que ocurre cuando una compañía ofrece a sus trabajadores opciones sobre las acciones de la empresa. Se trata de una práctica común y perfectamente legal que, sin embargo, puede generar beneficios incluso cuando la compañía produzca bienes de valor insignificante. Un ejemplo típico sería una empresa de Silicon Valley recién creada, la cual contrata a universitarios muy bien cualificados por un salario inferior a la media de mercado. Como complemento, les ofrece opciones sobre las acciones de la empresa, con la promesa de grandes ganancias futuras.

Los sueldos miserables garantizan que la compañía obtendrá beneficios incluso si cobra a sus clientes precios muy bajos por sus productos. Si la empresa paga a cada trabajador un salario inferior al precio de lo que este produce, obtendrá beneficios por cada empleado que contrate. Así, en el primer trimestre de actividad, la compañía contrata a un trabajador y le ofrece opciones equivalentes a la mitad de los beneficios esperados para ese período. En el siguiente trimestre, la empresa duplica el tamaño de su plantilla con un nuevo empleado, al que obsequia con opciones por valor de una cuarta parte de las ganancias hasta el fin de ese ciclo. En el tercer trimestre contrata a dos nuevos empleados, a quienes ofrece un paquete de opciones igual a un octavo de los beneficios hasta el fin del período, y así sucesivamente.

Ese plan asegurará que las ganancias de la empresa se dupliquen cada trimestre. Pero, debido a que los empleados reciben un porcentaje fijo de los beneficios, el retorno de sus opciones también se duplicará. Los ingresos del empresario provienen de la diferencia entre el valor de los bienes producidos por los trabajadores y sus bajos salarios. De ese monto, el propietario se queda con una parte y otorga el resto a los empleados veteranos en forma de beneficios asociados a las opciones.

El crecimiento exponencial del valor de las opciones hace que, a pesar de los bajos sueldos, trabajar para la empresa resulte seductor incluso para profesionales altamente cualificados. Sin embargo, este esquema de Ponzi camuflado llevará a la compañía a la bancarrota, ya que semejante crecimiento necesita que la plantilla aumente de manera indefinida, algo a todas luces imposible en un mundo finito. Al final, los empleados irán al paro o quedarán en posesión de opciones sin valor.

Un esquema de Ponzi camuflado que acabó mal fue el que involucró a la petrolera brasileña OGX, dirigida por el pintoresco exmultimillonario Eike Batista. El auge de OGX fue tan espectacular como su desaparición. Cuando se derrumbó en octubre de 2013, era el mayor moroso corporativo de la historia de Latinoamérica. Una de las estrategias empleadas por OGX fue cazar, ofreciéndoles jugosas opciones, a los empleados talentosos de otras compañías. El reparto de opciones continuó durante un tiempo. Mientras tanto, la deuda fue creciendo en forma de pirámide invertida hasta que la compañía implosionó y arruinó a trabajadores y a inversores.

Una vez más, regular tales actividades supone todo un reto, ya que tales esquemas de Ponzi camuflados pueden modificarse a mitad de camino y convertirse en una aventura empresarial completamente legítima. Con una coyuntura económica adecuada y un poco de suerte, una compañía que caiga en este tipo de prácticas puede acabar innovando y creando productos de gran valor, lo que le permitirá contratar a nuevos trabajadores sin ofrecerles opciones. En tal caso, podrá ralentizar su expansión y, poco a poco, tornarse viable sin la necesidad de crecer de manera indefinida.

Robar a Harsha para pagar a Gobar

Un cuento corto, *Rnam krttva* («Endeudarse si es necesario»), escrito por el conocido novelista bengalí de mediados del siglo XX Shibram Chakraborty, describe el funcionamiento básico de un esquema de Ponzi. El narrador cuenta cómo, un miércoles por la mañana, necesita urgentemente 500 rupias. Entonces recuerda a Harshabardhan, su crédulo amigo de la infancia, y se arma de valor para visitarlo. Lo convence para que le preste el dinero, con la promesa de que se lo devolverá el sábado. Pero, llegado el sábado, los problemas continúan. Por suerte se acuerda de otro ingenuo amigo de la infancia, Gobardhan, y pronto se las arregla para engatusarlo y sacarle otro préstamo de 500 rupias, asegurándole que se las reembolsará el miércoles. De esta manera consigue pagar las 500 rupias a Harshabardhan. Pero el miércoles siguiente debe remunerar a Gobardhan, por lo que se ve obligado a recurrir otra vez a Harsha, a quien recuerda que es un hombre de palabra. Así vuelve a lograr que Harsha le preste 500 rupias con las que pagar a Gobar. La operación se convierte en un evento semanal, de sábado a miércoles y de miércoles a sábado.

La calamidad parece avecinarse el día en que el narrador ve a Gobar y Harsha acercarse hacia él desde los dos lados de un cruce. Se siente mareado, pero se recupera a tiempo de decir lo encantado que está de encontrarse con sus dos mejores amigos. Tras una conversación intrascendente, les comenta que tiene un plan que, les asegura, no alterará sus vidas, pero les ahorrará un montón de trámites innecesarios: «Cada miércoles —le dice a Harsha— entrega por favor 500 rupias a Gobar. Y cada sábado —continúa dirigiéndose a Gobar— da 500 rupias a Harsha. Recordad que no debéis dejar de hacerlo nunca». Y mientras los perplejos amigos tratan de entenderlo, el narrador se despide y se va.

He aquí uno de los escollos a los que se enfrenta la regulación. El exceso de celo puede matar negocios legítimos y desincentivar la puesta en marcha otros nuevos. Por otro lado, la falta de regulación puede dar lugar a esquemas piramidales y estafas muy dañinas.

DEMASIADO GRANDE PARA QUEBRAR

Establecer un marco regulador supone un desafío de enormes proporciones cuando hablamos de actividades que combinan la financiación legítima y la fraudulenta. Si alguien asegura a un inversor que su dinero se destinará a fines productivos, pero, en realidad, las ganancias solo proceden de las pérdidas de los inversores futuros, podremos acusarle de estafa. Sin embargo, y al igual que ocurre con otros esquemas de Ponzi, tales operaciones pueden llevarse a cabo abiertamente y, aun así, atraer el dinero de multitud de incautos.

Parte del problema surge también de la irracionalidad humana básica. Dice mucho de la ortodoxia económica que haya sido necesaria una subdisciplina propia (la economía conductual) y una enorme cantidad de experimentos de laboratorio para establecer que, muy a menudo, los humanos no nos comportamos del modo racional que se espera de nosotros [*véase* «En la mente del consumidor», por Mirja Hubert y Peter Kenning; Mente y cerebro n.º 38, 2009]. Y, de la mano de ese reconocimiento, llega la necesidad de diseñar leyes que protejan a los más vulnerables.

Dice mucho de la ortodoxia económica que haya sido necesaria una subdisciplina propia (la economía conductual) y una enorme cantidad de experimentos de laboratorio para establecer que, muy a menudo, los humanos no nos comportamos de modo racional

Gracias a años de datos y análisis, hoy numerosas leyes tratan de prevenir aquellos esquemas de Ponzi que constituyen auténticas estafas dirigidas a incautos. En EE.UU., la Comisión de Valores y Bolsa se encarga de atajar esquemas de Ponzi fraudulentos. Normativas cada vez más complejas, como la Ley Dodd-Frank, aprobada en 2010, pretenden placar las múltiples formas que toman estos esquemas piramidales. Hace poco, en la India, un torrente de esquemas de Ponzi promovió discusiones para enmendar la Ley de 1992 de la Junta de Valores y Bolsa del país, a fin de controlar con mayor eficacia los fraudes financieros.

Una dificultad importante en la regulación de esquemas de Ponzi, legales o no, tiene que ver con la idiosincrasia de las políticas nacionales. Numerosos Gobiernos, sobre todo en las economías industriales, han intervenido y rescatado grandes entidades cuando estaban a punto de quebrar. Una corporación «demasiado grande para quebrar» (*too big to fail*, una noción lo suficientemente extendida como para haber adquirido las tristes siglas TBTF) puede atraer inversores incluso en plena ejecución de un esquema de Ponzi, animados por la idea de que, una vez que la empresa supere cierto tamaño, el Gobierno intervendrá con dinero público para evitar su quiebra. Ello protegería a los inversores, si no totalmente, al menos en parte.

La justificación de tales políticas reside en la creencia de que, si una gran compañía se declara en quiebra, los daños colaterales a los ciudadanos de a pie pueden ser aún mayores que el precio de un rescate gubernamental. No obstante, ahora parece claro que un TBTF políticamente bienintencionado —o, para el caso, uno malintencionado pero bien disimulado— puede agravar una crisis, pues viene a garantizar que, si hay beneficios, serán para los mandamases financieros, pero si se producen pérdidas, las asumirán los contribuyentes.

Este comportamiento ha desempeñado un papel claro en la reciente crisis económica mundial. La situación impulsó a empresas financieras irresponsables a correr riesgos temerarios. Está claro que se necesita una política que, en ocasiones especiales, permita que el Gobierno intervenga para salvar a una empresa de la ruina. Sin embargo, ello no tiene por qué suponer el socorro de quienes dirigen la compañía y toman las decisiones. Con esto en mente, varias naciones están tratando de crear guías de actuación para atar en corto a las empresas financieras y asegurarse de que el dinero del contribuyente no tendrá que emplearse en salvar a grandes corporaciones del colapso.

Entre otras ideas novedosas impulsadas por la última década de estafas y crisis se encuentra un sistema de prescripción para productos financieros. Al igual que un médico que receta un fármaco potencialmente peligroso, dicho sistema obligaría a que un profesional del ramo diese el visto bueno a un nuevo producto financiero, como una hipoteca inmobiliaria compleja, antes de que el comprador firme.

Con todo, incluso si las empresas adoptan tales medidas, los esquemas de Ponzi y las burbujas financieras concomitantes seguirán constituyendo un subproducto tóxico de toda economía nacional. A cada nueva regulación seguirá la aparición de un ingenioso producto financiero ideado para esquilmar el dinero a la gente... y la consiguiente necesidad de otra respuesta por parte de los reguladores.

PARA SABER MÁS

Irrational exuberance. Robert J. Shiller. Princeton University Press, 2000.
Ponzi's scheme: The true story of a financial legend. Mitchell Zuckoff. Random House, 2005.
Animal spirits: How human psychology drives the global economy, and why it matters for global capitalism. George A. Akerlof y Robert J. Shiller. Princeton University Press, 2009.
A marketing scheme for making money off innocent people: A user's manual. Kaushik Basu en *Economic Letters*, vol. 107, n.º 2, págs. 122-124, mayo de 2010.

MATERIALES

Cuasicristales extraterrestres

Numerosos científicos pensaban que estos exóticos materiales, con una estructura intermedia entre el orden y el desorden, no podían originarse en la naturaleza. El primer cuasicristal no sintético ha resultado tener un origen insólito

Luca Bindi



EN SÍNTESIS

En 1984 se postuló la existencia de cuasicristales, materiales con estructura intermedia entre el estado cristalino y el amorfo. La confirmación experimental llegó ese mismo año de la mano de ciertas aleaciones sintéticas.

Desde entonces, los científicos se han preguntado si los cuasicristales podrían también tener un origen natural. Hace unos años, el Museo de Historia Natural de la Universidad de Florencia proporcionó la respuesta.

El museo florentino albergaba una muestra mineral procedente de Rusia, la cual resultó contener fragmentos de un cuasicristal natural. Análisis posteriores revelaron que su origen se remontaba a la época de formación del sistema solar.



Luca Bindi es profesor de mineralogía y cristalografía en la Universidad de Florencia. Su labor investigadora se centra en la complejidad estructural de los minerales.

Hace siglos que el ser humano comenzó a interesarse por los materiales geológicos. Los minerales, constituyentes naturales de nuestro mundo sólido, se han descrito tradicionalmente como estructuras cristalinas; es decir, aquellas en las que los átomos se disponen de manera ordenada en configuraciones que se repiten a intervalos regulares. Los hexágonos de un panal o las baldosas cuadradas de un pavimento proporcionan ejemplos sencillos de estructuras periódicas bidimensionales.

Sin embargo, según ciertas leyes matemáticas descubiertas en el siglo XIX, dicha periodicidad solo puede darse en presencia de determinadas simetrías rotacionales: las de orden uno, dos, tres, cuatro y seis. Por el contrario, las simetrías rotacionales de orden cinco, siete y superiores resultan incompatibles con la simetría bajo traslaciones. Eso explica que pueda llenarse un plano de manera congruente (sin dejar huecos) con rectángulos, triángulos equiláteros, cuadrados o hexágonos, pero no así con pentágonos, heptágonos u octógonos. Los rectángulos se caracterizan por poseer un eje de simetría rotacional de orden dos, así llamado porque, al aplicar una rotación de 180 grados (media circunferencia) en torno a dicho eje, la figura recupera su aspecto inicial. Los triángulos equiláteros presentan una simetría de orden tres (360/3 grados), y los cuadrados y hexágonos, de orden cuatro y seis, respectivamente.

En 1984, Dov Levine, hoy en el Instituto Technion de Haifa, en Israel, y Paul J. Steinhardt, en la actualidad en la Universidad de Princeton, postularon la existencia de un nuevo tipo de material: uno caracterizado por un estado intermedio entre el cristalino y el amorfo. Tales propiedades resultaban tan particulares que, de hecho, los propios autores lo denominaron en un principio *cristal imposible* y, más adelante, *cuasicristal*, acrónimo de «cristal cuasiperiódico». Los átomos de dichos materiales debían presentar una disposición entre periódica y desordenada, con dos o más agrupaciones atómicas que se repetirían a intervalos diferentes, pero en la que el cociente entre dichos períodos de traslación quedaría determinado por un número irracional. En otras palabras, estructuras con una especie de «disonancia espacial».

Como consecuencia de esas propiedades, los cuasicristales podrían presentar algunas de las simetrías rotacionales vetadas a los cristales ordinarios, como una simetría pentagonal en un plano o una icosaédrica (la de un balón de fútbol) en tres dimensiones. Un ejemplo clásico lo hallamos en el teselado concebido en 1974 por el físico matemático Roger Penrose, caracterizado por una simetría pentagonal y compuesto por dos teselas que se repiten en intervalos cuya proporción queda determinada por el número áureo.

Sin embargo, la hipótesis de Levine y Steinhardt requería una confirmación experimental. Y, como ocurre a menudo con los grandes descubrimientos, esta aguardaba a la vuelta de la esquina. Ese mismo año, Dan Shechtman e Ilan Blech, ambos del Technion, Denis Gratias, del CNRS francés, y John Cahn, de la Oficina Nacional de Estándares de EE.UU., hallaron dicha prueba al estudiar al microscopio electrónico de transmisión ciertas aleaciones sintéticas sobreenfriadas de aluminio y manganeso. Sus resultados, publicados en 1984 en *Physical Review Letters*, se consideran hoy un hito de la cristalografía estructural y la física del estado sólido. A pesar del gran escepticismo que durante los años siguientes suscitó el hallazgo (incluida una prolongada batalla con Linus Pauling, dos veces ganador del premio Nobel, de química y de la paz), la labor de Shechtman se vería recompensada en 2011 con el Nobel de química.

Hoy la comunidad científica acepta la existencia de los cuasicristales. Gracias a diversas técnicas, en el laboratorio se han sintetizado más de un centenar de ellos, con composiciones químicas y simetrías muy variadas. Sin embargo, aún no se ha alcanzado un consenso acerca de su estatus en cuanto a estado fundamental de la materia. Algunos investigadores consideran que, aunque posibles bajo condiciones controladas, los cuasicristales constituyen materiales metaestables muy delicados y, por tanto, demasiado complejos para formar una fase estable de la materia. Por el contrario, otros sostienen que se trata de fases robustas y energéticamente estables, al igual que los cristales ordinarios.

¿Quién está en lo cierto? Responder a tal pregunta supondría dar con la solución a un enigma fundamental de la física del estado sólido. ¿Podría ayudarnos la naturaleza a resolver el misterio? De ser cierta la primera teoría, tal vez no. Pero, en caso contrario, cabría pensar que, al igual que los materiales cristalinos, los cuasicristales pueden también formarse bajo condiciones naturales.

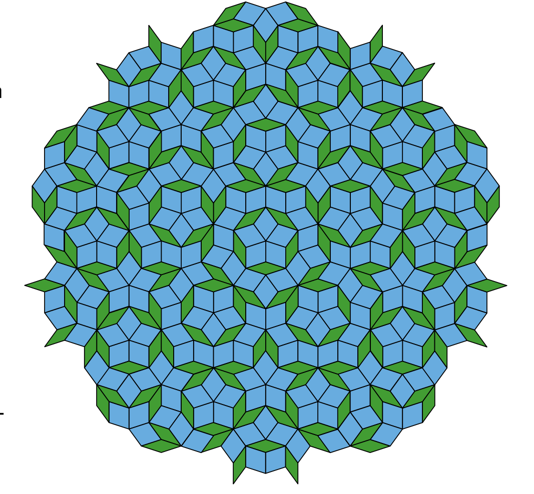
ESTATUS INCIERTO

La búsqueda de cuasicristales en el reino mineral comenzó a finales de los años noventa, inicialmente dirigida por Steinhardt y, años más tarde, por Steinhardt y el autor del presente artículo. La motivación para llevar a cabo tales investigaciones no solo obedecía al enigma sobre el estatus de los cuasicristales en la naturaleza, sino a otros aspectos de interés para varias disciplinas. En el caso de la geología, el descubrimiento de un cuasicristal natural abriría un nuevo capítulo en mineralogía, ya que modificaría por completo la clasificación tradicional de los minerales. Para la física de la materia condensada, el hallazgo catapultaría hacia atrás en varios órdenes de magnitud la edad del cuasicristal más antiguo, lo que daría una idea sobre la formación de estos materiales.

Razón irracional

Un cristal se encuentra formado por agrupaciones de átomos cuya disposición se repite a intervalos regulares, como ocurre con los hexágonos de un panal. Los cristales pueden presentar simetrías rotacionales de orden uno, dos, tres, cuatro y seis; sin embargo, las simetrías de orden cinco, siete y superiores resultan incompatibles con la simetría bajo traslaciones.

Los cuasicristales se componen de dos o más agrupaciones de átomos, las cuales se repiten a intervalos cuya proporción no puede expresarse como un cociente entre números enteros. En dos dimensiones, una distribución de ese tipo es el teselado de Penrose (*imagen*), descrito en 1974 por el físico teórico Roger Penrose. Este mosaico se compone de dos tipos de teselas, dispuestas de tal modo que emerge una simetría pentagonal. Al examinarlo con detalle, se observa que la proporción entre las distancias que caracterizan el embaldosamiento viene dada por la sucesión de Fibonacci, en la que el cociente entre dos términos sucesivos tiende al número áureo, $(1 + \sqrt{5})/2$.



Por otro lado, el descubrimiento de un cuasicristal natural ofrecería una manera de estudiar su estabilidad en condiciones imposibles de reproducir en un laboratorio. Un hallazgo de tal calibre podría revelar nuevas condiciones fisicoquímicas, vinculadas a procesos naturales terrestres o extraterrestres. Sin embargo, tras seleccionar un centenar de muestras, analizarlas, establecer parámetros estadísticos que pudieran apuntar a candidatos prometedores y llevar a cabo gran cantidad de otros experimentos, el resultado fue un absoluto fracaso.

Así que, por pura tenacidad, en 2008 decidimos proceder de otro modo: estudiar si en la naturaleza existía algún material cuya composición química fuese similar a alguno de los cuasicristales sintetizados en el laboratorio. De modo que nos sentamos ante la lista de cuasicristales artificiales conocidos y tratamos de comprobar si compartían alguna característica, si existía algún parámetro que pudiera relacionarlos entre sí. La respuesta se hallaba ante nuestros ojos, simple e inmediata: casi todos los cuasicristales artificiales contenían aluminio, muy a menudo combinado con cobre.

Lo más inteligente parecía verificar si se habían descrito minerales con composiciones semejantes. De ser así, constituirían el punto de partida. Nuestras búsquedas en bases de datos mineralógicas concluyeron enseguida. En efecto, en la naturaleza existían dos minerales con composiciones similares a la que buscábamos: la khatyrkita ($CuAl_2$) y la cupalita (CuAl), dos aleaciones cristalinas descritas por primera vez en 1985 por un equipo de científicos soviéticos dirigido por un tal Leonid Razin. Ambas se habían hallado al tamizar concentrados pesados buscando platino en los torrentes de las montañas de Koryak, en la región de Chukotka, situada en el extremo oriental de Rusia.

Comprobamos si alguno de ellos se encontraba en el Museo de Historia Natural de la Universidad de Florencia. La suerte se puso de nuestro lado: a pesar de la rareza de aquellas especies minerales, en la colección del museo florentino existía una muestra etiquetada como khatyrkita. Un comerciante holandés la había vendido al museo en 1990 y se había catalogado como originaria de Khatyrka; es decir, la misma localidad de la que procedía el ejemplar tipo descrito en 1985 por Razin y sus colaboradores. Sin embargo, en el momento de su registro no existía ninguna prueba directa de que el espécimen adquirido proviniese realmente de las montañas de Koryak.

Tras una indagación digna de la mejor película de acción y después de una charla con Valery V. Kryachko, la persona que había hallado la muestra, pudimos reconstruir su historia y verificar que el ejemplar procedía de un lecho de arcilla verde azulada a lo largo del torrente Listventovyi, en las proximidades del río Iomrautvaam, afluente del Khatryka. Rastrear el origen de la muestra florentina resultaba fundamental si algún día decidíamos organizar una campaña científica hasta allí.

De acuerdo con la metodología clásica para caracterizar muestras geológicas, comenzamos a estudiar la composición interna y externa del ejemplar florentino. Se componía principalmente de khatyrkita y cupalita, junto con otros minerales silicatados frecuentes. Sin embargo, contenía también dos pequeños fragmentos de unos 0,06 milímetros, los cuales presentaban una composición distinta: una combinación de aluminio, cobre y hierro. La proporción entre los tres elementos nos dejó boquiabiertos: $Al_{63}Cu_{24}Fe_{13}$, exactamente la misma que la de un cuasicristal artificial sintetizado en 1987 y en el que se había detectado la simetría prohibida.

Una vez caracterizada su composición química, decidimos analizarla mediante difracción de rayos X, la técnica estándar



MUESTRA FLORENTINA: El primer cuasicristal natural fue hallado en el seno de una muestra del Museo de Historia Natural de la Universidad de Florencia. El ejemplar presenta el aspecto típico de una roca; es decir, un agregado de distintos minerales. Arriba a la izquierda se observa la muestra en su caja original.

WIKIMEDIA COMMONS/DOMINIO PÚBLICO (*teselado de Penrose*); CORTESÍA DE SAULO BAMBI, MUSEO DE HISTORIA NATURAL DE LA UNIVERSIDAD DE FLORENCIA, Y MARIA CRISTINA ANDREANI (*muestras*)

para tomar la «huella digital» a un mineral. Una vez más, encajaba casi a la perfección con la del material sintético. Nos vimos convencidos y entusiasmados: tal vez, treinta años después del descubrimiento del primer cuasicristal sintético, estábamos a punto de encontrar el primer ejemplar natural.

Pero, para poder hacer público el hallazgo, faltaba la prueba definitiva. La «pistola humeante», o *smoking gun*, como gusta decir a los estadounidenses. Dado el escepticismo que había rodeado la publicación de Shechtman en 1984, queríamos hacer todo lo posible para dar a conocer una noticia inquebrantable. Por ello, en noviembre de 2008 llevamos los dos pequeños fragmentos extraídos de la muestra florentina a la Universidad de Princeton, con el objetivo de obtener una imagen del eje de orden cinco mediante difracción de electrones con microscopía electrónica de transmisión.

El experimento se inició el 1 de enero de 2009. Al cabo de unas horas, apareció ante nuestros ojos la imagen del eje de orden cinco que corroboraba la simetría prohibida. Permanecimos un rato mirándola en silencio. Conscientes del alcance del descubrimiento, nos abrazamos en una mezcla de conmoción y nerviosismo. Proseguimos con nuestro estudio y obtuvimos imágenes de ejes de orden tres y dos, lo cual revelaba una simetría icosaédrica. Habíamos encontrado la pistola humeante. Disfrutamos escribiendo el artículo para la revista *Science* y nos granjeamos revisiones entusiastas por parte de nuestros colegas de profesión.

Dado que estábamos describiendo una composición y estructura nunca antes observadas en la naturaleza, el cuasicristal se sometió al órgano competente, la Asociación Internacional de Mineralogía, para obtener su aprobación en calidad de nueva especie mineral. Escogimos el nombre *icosaedrita*, en referencia a la simetría prohibida que presentaba. La nueva especie fue reconocida como tal y su nombre aprobado en 2010. El ejemplar tipo se encuentra hoy en la colección mineralógica del Museo de Historia Natural de la Universidad de Florencia.

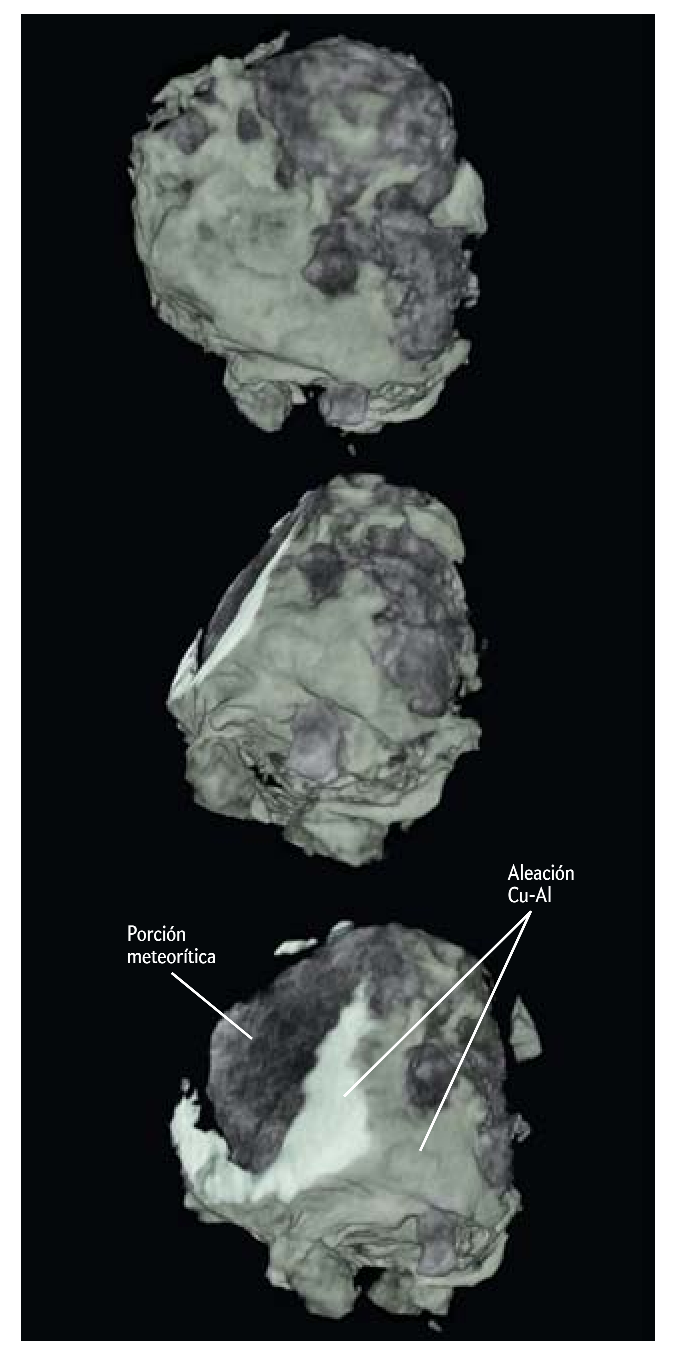
¿TERRESTRE O EXTRATERRESTRE?

Con todo, quedaba pendiente una cuestión de gran relevancia: comprender qué proceso geológico había dado origen a un material tan exótico como la icosaedrita. Tanto este mineral como las dos aleaciones cristalinas asociadas, la khatyrkita y la cupalita, presentaban una característica química inesperada: la presencia de aluminio combinado con oxígeno. Se sabe que el aluminio metálico tiende a oxidarse con extrema facilidad al entrar en contacto con el oxígeno; de hecho, solo es posible encontrarlo en ambientes muy reductores, pobres en oxígeno, como el de los laboratorios o los procesos industriales. Eso obligaba a considerar la posibilidad de que, en realidad, la muestra fuese escoria o un subproducto accidental de algún proceso derivado de la actividad humana.

A fin de esclarecer la cuestión, contactamos con dos reputados geólogos estadounidenses: Lincoln Hollister, de la Universidad de Princeton, y Glenn MacPherson, del Instituto Smithsoniano. El primero es especialista en materiales formados bajo altas presiones; el segundo, uno de los mayores expertos del mundo en meteoritos. Deseábamos enseñarles la muestra y conocer su opinión.

En un primer momento, ambos emitieron el mismo veredicto: lo que les estábamos mostrando era imposible desde un punto de vista geológico. Después, sin embargo, admitieron que el tipo de asociación mineral que presentaba la muestra florentina habría podido formarse en ambientes caracterizados por presiones y temperaturas extremadamente altas, como las existentes en el límite entre el manto y el núcleo terrestres o, también, en una colisión entre meteoritos y asteroides en el espacio. Tomamos la segunda interpretación como una victoria: «Así que no es imposible, sino solo muy improbable», pensamos.

La clave para dilucidar el origen de la muestra florentina llegó con el descubrimiento de que la icosaedrita escondía un



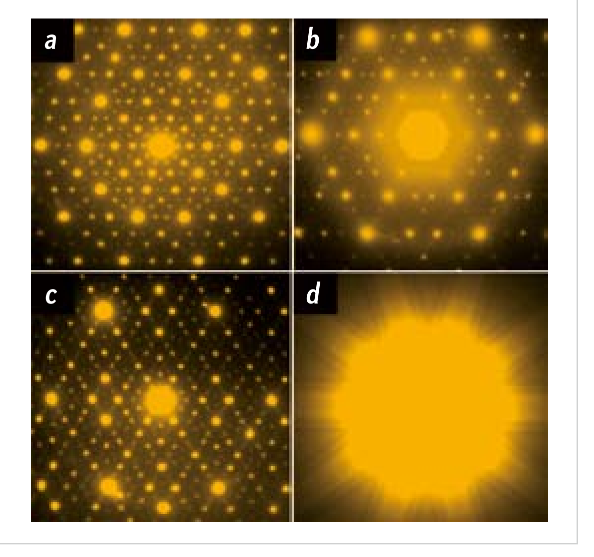
NUEVOS EJEMPLARES: Una expedición a la región de Chukotka, en Rusia, permitió hallar nuevos ejemplares del cuasicristal florentino. Estas imágenes, obtenidas mediante microtomografía computerizada de rayos X, muestran un fragmento de unos 1,2 milímetros. Las regiones más claras corresponden a zonas metálicas de cobre y aluminio; las oscuras, a porciones meteoríticas.

CORTESÍA DE LUCA BINDI

La huella de una simetría prohibida

La simetría de un sólido se determina bombardeando una muestra con electrones y examinando después el patrón de difracción obtenido a lo largo de distintas direcciones. Si los átomos se distribuyen de forma desordenada, dicho patrón se compondrá de anillos difusos. En cambio, si se trata de un cristal o de un cuasicristal, la difracción reflejará la simetría del material en la dirección en la que incide el haz de electrones.

Los experimentos de difracción efectuados con el cuasicristal natural de Florencia reflejan una simetría icosaédrica; es decir, la de un balón de fútbol. Al orientar el haz electrónico a lo largo de uno u otro eje, se obtienen patrones con simetrías de orden cinco (*a*), tres (*b*) y dos (*c*). La simetría pentagonal se hace evidente a partir de las líneas de Kikuchi (*d*), visibles mediante difracción de electrones de haz convergente.



fragmento de 50 nanómetros de stishovita, una forma cristalina del dióxido de silicio que solo se genera bajo presiones muy elevadas, de unas 100.000 atmósferas. La presencia de un mineral tan particular en la muestra florentina indicaba presiones de formación muy altas, lo que nos hizo recordar los hipotéticos ambientes de formación: regiones muy profundas de nuestro planeta o colisiones entre meteoritos y asteroides. Suponiendo que el origen se hallase en uno de esos dos ambientes, ¿podríamos distinguir entre materiales terrestres y extraterrestres? En efecto: a partir de la composición isotópica del oxígeno.

Los isótopos estables contenidos en los meteoritos conservan las anomalías que reinaron durante la formación del sistema solar. Estas quedan patentes en la distribución isotópica de algunos elementos ligeros, como hidrógeno, carbono, nitrógeno u oxígeno. Dado que la muestra presentaba distintos minerales oxigenados, nos fijamos en los isótopos del oxígeno. Existen tres isótopos naturales de este elemento: ^{16}O, ^{17}O y ^{18}O. El más abundante es el ^{16}O, seguido del ^{18}O, en un pequeño porcentaje, y el ^{17}O, en una proporción aún menor.

Al analizar una muestra se consideran las proporciones $^{18}O/^{16}O$ y $^{17}O/^{16}O$. En colaboración con el Instituto de Tecnología de California, llevamos a cabo una serie de experimentos a fin de determinar la composición isotópica de la muestra. Los resultados fueron inequívocos: dicha composición se asemejaba a la observada en las condritas carbonáceas, cierta clase de meteoritos [*véase* «Meteoritos primitivos», por Alan E. Rubin; Investigación y Ciencia, abril de 2013]. Lo más interesante era que nunca antes se habían observado aleaciones de aluminio metálico en meteoritos. Por tanto, cabía concluir que la muestra correspondía a un nuevo tipo de cuerpo extraterrestre, el cual probablemente se remontaba a unos 4500 millones de años atrás; es decir, a la etapa de formación del sistema solar.

Pero ¿cómo continuar nuestras investigaciones? Tras todos los experimentos a los que la habíamos sometido, la muestra florentina se encontraba prácticamente agotada. Si deseábamos seguir adelante, la única posibilidad pasaba por viajar hasta el lugar del hallazgo original y, con suerte, encontrar allí otras muestras. Así pues, organizamos una expedición a las montañas de Koryak.

En verano de 2011, un equipo de geólogos de EE.UU., Italia y Rusia llevó a cabo una campaña con un doble objetivo: buscar nuevos ejemplares en la región de la que procedía la muestra florentina, y estudiar en detalle la geología de la zona. El análisis de 1,5 toneladas de arcilla trajo consigo el descubrimiento de nuevos fragmentos con características típicas de los meteoritos y con aleaciones de cobre y aluminio; entre ellos, algunos cuasicristales. Esos hallazgos permitieron catalogar el nuevo meteorito con el nombre de khatyrka, aprobado por el Comité de Nomenclatura de la Sociedad Meteorítica. Gracias a los nuevos fragmentos, podrán efectuarse otros experimentos a fin de determinar con mayor precisión las condiciones en las que se formaron la icosaedrita y las demás aleaciones cristalinas.

El descubrimiento de la icosaedrita nos está diciendo que el cuasicristal más antiguo conocido posee una antigüedad de 4500 millones de años. Su origen meteorítico demuestra que tales materiales pueden formarse en condiciones astrofísicas. No obstante, sigue abierta la cuestión de si un cuasicristal puede formarse en el curso de la evolución planetaria o bajo condiciones terrestres. Pero, de momento, parece muy probable.

Nos gustaría pensar que nuestra historia, llena de emociones tan dispares como la duda, el miedo, la agonía de la derrota y la felicidad de la victoria, servirá de estímulo para que una nueva generación de científicos investigue otros cuasicristales. Su estudio no ha concluido: aún queda mucho por descubrir.

PARA SABER MÁS

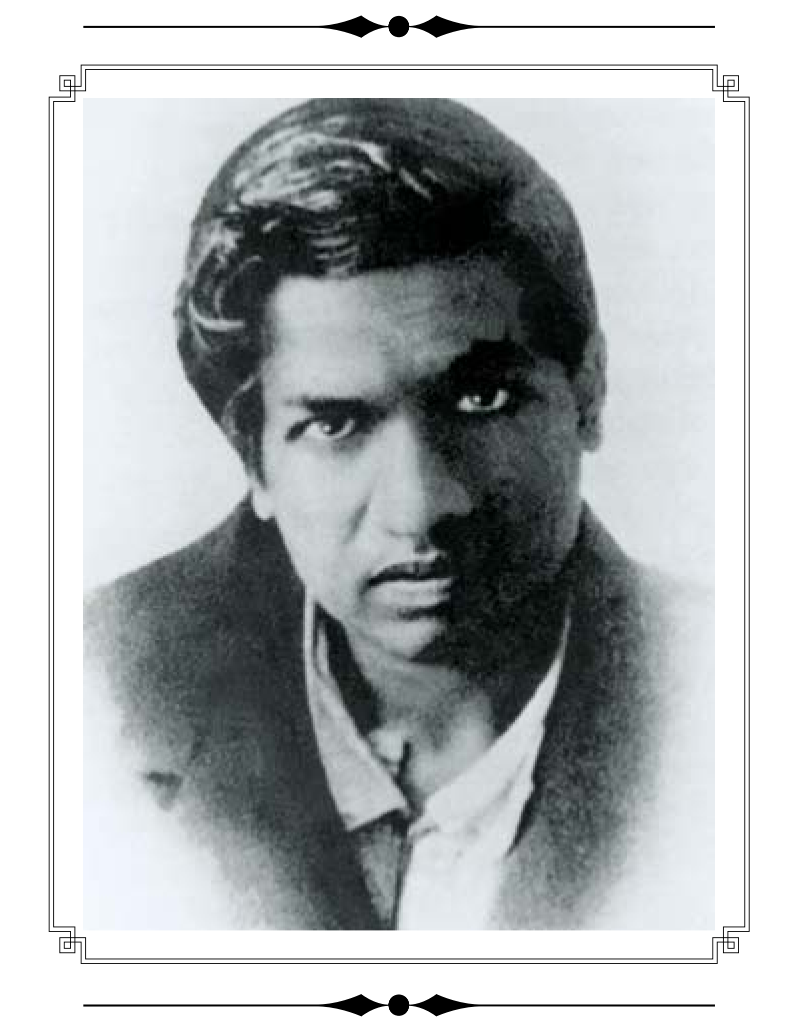
Natural quasicrystals. L. Bindi et al. en *Science*, vol. 324, págs. 1306-1309, 5 de enero de 2009.
Crystallography of quasicrystals. Concepts, methods and structures. W. Steurer y S. Deloudi. Springer, 2009.
Evidence for the extra-terrestrial origin of a natural quasicrystal. L. Bindi et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 109, págs. 1396-1401, enero de 2012.
Cristalli impossibili, o quasi. E. Puppin en *Le Scienze*, n.º 522, febrero de 2012.

EN NUESTRO ARCHIVO

Cuasicristales. David R. Nelson en *IyC*, octubre de 1986.
Estructura de los cuasicristales. Peter W. Stephens y Alan L. Goldman en *IyC*, junio de 1991.

SRINIVASA RAMANUJAN (*página opuesta*), quien falleció en 1920 a la edad de 32 años, llenó varios cuadernos con ideas, algunas de ellas muy profundas, sobre el comportamiento de los números. Sus notas (*arriba*) han inspirado a los matemáticos desde entonces.

El oráculo de Ramanujan



Las pistas escondidas en los cuadernos sin publicar del genio indio han permitido resolver importantes problemas en teoría de números

Ariel Bleicher

Ariel Bleicher es periodista científica.



U NA MAÑANA DE DOMINGO DE 1984, CUANDO KEN ONO AÚN ATENDÍA CLASES EN EL instituto, el hoy matemático de la Universidad Emory abrió el buzón de su casa de Baltimore y encontró un sobre, fino como papel de arroz, cubierto de sellos brillantes. Iba dirigido a su padre, un reservado matemático japonés. Cuando Ono le entregó el correo, el hombre dejó caer el bolígrafo sobre las hojas amarillentas donde siempre escribía sus ecuaciones, abrió con cuidado el sobre y extrajo una carta.

«Estimado señor», comenzaba la misiva, «he sabido que usted ha contribuido a financiar una escultura en memoria de mi difunto marido, [...] lo que me llena de alegría». El escrito estaba firmado por S. Janaki Ammal, a la que el membrete en tinta roja identificaba como la viuda del «(difunto) Srinivasa Ramanujan (genio de las matemáticas)».

Era la primera vez que el joven Ono escuchaba hablar del legendario Ramanujan, un prodigio autodidacta que, hace un siglo, realizaba afirmaciones crípticas que, en palabras de Godfrey Harold Hardy, su colaborador británico, parecían «casi imposibles de creer». Sus trabajos han abierto campos enteros de investigación y han proporcionado pistas sobre teorías que, en más de un caso, han llevado a sus autores a ganar la medalla Fields, considerada el equivalente al premio Nobel de matemáticas.

Durante su época de estudiante, Ono nunca se vio impelido a prestar una atención especial a la obra de Ramanujan. Hasta donde sabía, el genio nunca había trabajado en la especialidad de Ono: las formas modulares, objetos bidimensionales abstractos que exhiben simetrías notables.

Ramanujan reapareció en la vida de Ono en 1998, cuando el matemático contaba 29 años. Mientras completaba una antología sobre la obra del indio, el matemático Bruce C. Berndt, de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, había hallado un manuscrito al que nadie hasta entonces había prestado suficiente atención. Dado que el documento versaba sobre formas modulares, Berndt pensó que Ono sería capaz de descifrar algunas de sus enigmáticas afirmaciones.

Tras leer dos tercios del texto, Ono se detuvo. Con la letra clara de un escolar, Ramanujan había escrito seis ecuaciones que, a pesar de que trataban sobre un campo en el que él era experto, le parecieron tremendamente extrañas. Ono quedó perplejo. Estaba seguro de que se trataba de relaciones falsas. Las miró y pensó: «De ninguna manera. Esto es basura». Su primer impulso fue demostrar que Ramanujan se había equivocado.

SINE QUA NON

Nadie acierta a entender cómo llegaba Ramanujan a las conclusiones que escribía. Aprendió matemáticas por sí solo, con ayuda

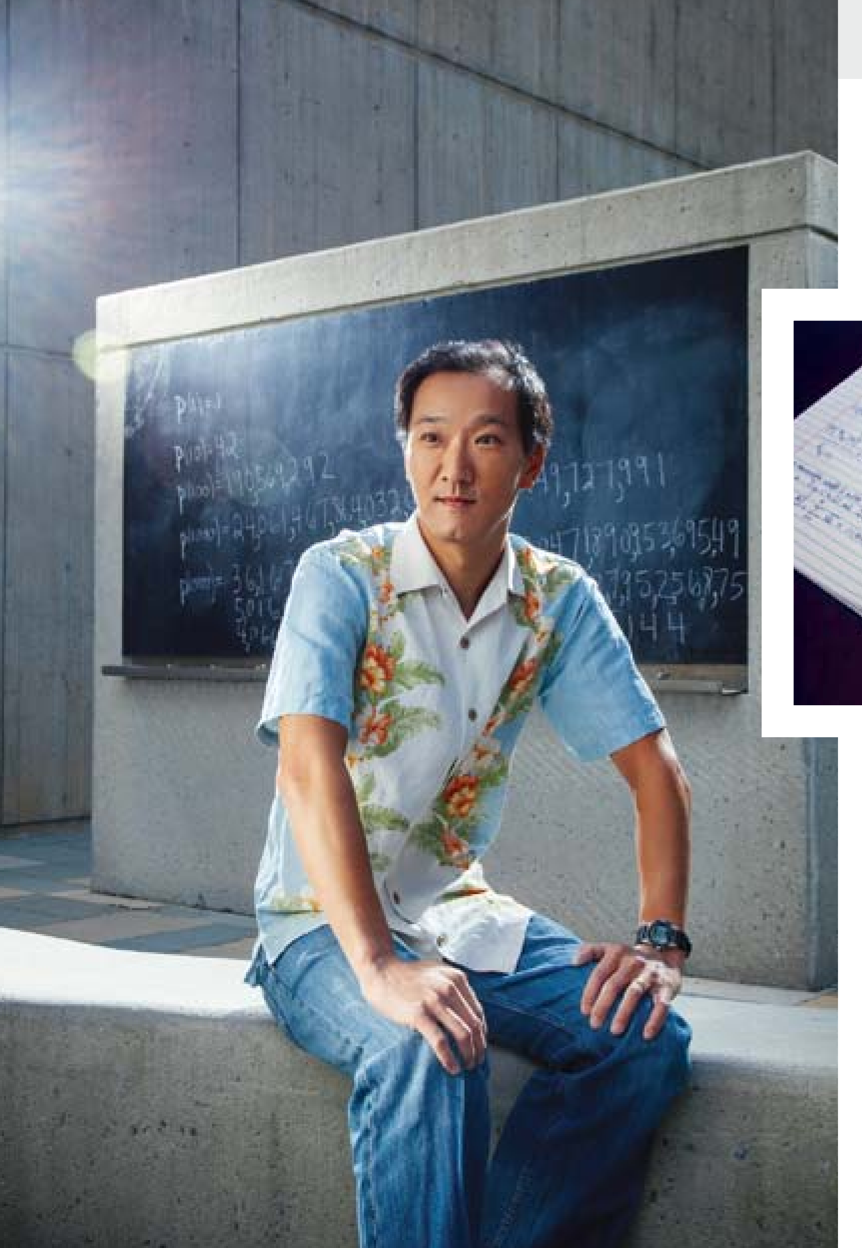
EN SÍNTESIS

Genio autodidacta, Srinivasa Ramanujan llenó varios cuadernos con teoremas, algunos de ellos misteriosos, sobre las propiedades de los números. Muchos han dado lugar a nuevos campos de investigación.

Junto con otros investigadores, el matemático Ken Ono ha realizado algunos descubrimientos de primer orden a partir de anotaciones en los cuadernos de Ramanujan que habían pasado inadvertidas hasta ahora.

Aparte de sus aplicaciones en matemática pura, ciertos hallazgos podrían emplearse para diseñar métodos de cifrado más seguros o para profundizar en la estructura matemática de los agujeros negros.

PÁGINAS ANTERIORES: CORTESÍA DE JON SMITH, TRINITY COLLEGE, UNIVERSIDAD DE CAMBRIDGE (*anotaciones*); SCIENCE SOURCE (*Ramanujan*)



EL MATEMÁTICO KEN ONO, de la Universidad Emory (*izquierda*) y algunas de sus anotaciones (*abajo*).



AUDRA MELTON (*Ono*); CORTESÍA DE MCKENZIE WEST (*anotaciones*)

de un manual inglés pasado de moda. A los 20 años, mientras trabajaba como funcionario, comenzó a enviar sus ideas a varios investigadores británicos. Solo recibió una respuesta. Venía de Hardy, por aquel entonces un prometedor catedrático, quien lo invitó a trasladarse a Cambridge para trabajar con él. Después de tres años colaborando juntos, Ramanujan enfermó a consecuencia de las hambrunas de la Primera Guerra Mundial. Demacrado y con fiebre, volvió a la India y murió en 1920, a la edad de 32 años.

Además de sus 37 artículos publicados, Ramanujan dejó una pequeña colección de cartas, manuscritos incompletos y tres cuadernos de notas. Al examinarlos, Hardy y otros comprobaron que el indio había redescubierto teoremas clásicos de teoría de números, formulados en su día por matemáticos brillantes. Pero, además, Ramanujan había demostrado teoremas nuevos. Todo matemático respalda sus conclusiones con demostraciones: secuencias de argumentos lógicos capaces de convencer a cualquiera de su veracidad. Pero Ramanujan no se tomaba tales molestias. Llenaba páginas y páginas con interminables listas de teoremas y cálculos y rara vez se detenía a explicar cómo había llegado a ellos. Solo los tres cuadernos contienen más de 3000 conclusiones de este tipo sobre la naturaleza de los números, que, después de su muerte, han dado mucho trabajo a quienes han intentado demostrar si eran ciertas o falsas.

Berndt comenzó a indagar en los archivos de Ramanujan en 1970. Dos décadas después aún estaba en ello, cuando encontró el manuscrito con las seis llamativas ecuaciones, las mismas que Ono estaba convencido de poder demostrar que eran falsas. Estas relacionaban las formas modulares con los números de partición; es decir, con la secuencia de números que indica las distintas formas de escribir un entero como suma de otros. Esa lista queda caracterizada por la función de partición, $p(n)$, la cual cuenta el número de combinaciones de enteros positivos que, sumados, dan como resultado n. Por ejemplo, $p(4) = 5$, ya que 4 se puede obtener como 1 + 1 + 1 + 1, 1 + 1 + 2, 2 + 2, 3 + 1 y 4.

La función de partición y la lista de números que esta genera tal vez parezca algo muy sencillo. Sin embargo, los matemáticos llevan siglos intentando encontrar pautas que permitan predecir esos números, calcularlos o relacionarlos con otras funciones. Junto con Hardy, Ramanujan logró uno de los primeros descubrimientos revolucionarios: un método para aproximar la función de partición. A fin de comprobar cuán precisa era su aproximación, contrataron a Percy Alexander MacMahon (Mayor MacMahon), artillero británico y mago de los cálculos, para que calculase a mano las particiones de los primeros 200 números. Las aproximaciones de Hardy y Ramanujan resultaron ser muy precisas. Pero, además, al estudiar la lista de MacMahon, Ramanujan logró uno de sus descubrimientos más célebres.

Comenzando por $n = 0$, MacMahon había ordenado los números $p(n)$ en cinco columnas. Ramanujan se percató de que todas las entradas de la última columna (es decir, cada 5 números) eran divisibles entre 5, y fue capaz de demostrar que esa pauta proseguía para siempre. Las particiones tienen que ver con la suma de números, por lo que, a priori, no hay ninguna razón para pensar que deba relacionarse con la división.

1	1	2	3	5
7	11	15	22	30
42	56	77	101	135
176	231	297	385	490
627	792	1002	1255	1575

Ramanujan se percató de que, en los números de partición, cada quinto número (*columna derecha*) era divisible entre cinco

Ramanujan descubrió más propiedades similares. Demostró, por ejemplo, que cada séptimo número de partición, empezando por $p(5)$, es divisible entre 7, y que cada undécimo número, empezando por $p(6)$, es divisible entre 11. Misteriosamente, las «congruencias de Ramanujan» se terminan aquí. «Parece que no existen propiedades igualmente simples que involucren otros números primos», escribió el indio en 1919, refiriéndose a los primos 5, 7 y 11.

Tras su muerte, otros matemáticos se preguntaron si los números de partición exhibirían propiedades más complejas. Pero, a finales de los años noventa, solo habían hallado unas pocas congruencias más, relacionadas con lo que no parecían ser sino números primos aleatorios, como 29, 17^3 y 23^6. Así pues, los expertos empezaron a sospechar que tales patrones eran impredecibles y muy, muy raros.

Pero, después de luchar con las seis ecuaciones del manuscrito de Ramanujan, Ono comenzó a pensar que tal vez esas suposiciones anduviesen muy erradas. Hacía tiempo que se creía que los números de partición estaban vinculados con un conjunto reducido de formas modulares. Para sorpresa de Ono, las ecuaciones de Ramanujan relacionaban ambos campos de una forma que nunca nadie había imaginado antes.

Dado que Ramanujan no escribía sus demostraciones, Ono no podía identificar posibles errores en la lógica del genio. Así que decidió comprobar aquellas ecuaciones sustituyendo algunos números en ellas, con la esperanza de encontrar algún fallo. Sin embargo, todos los intentos funcionaron a la perfección. Ono se dio cuenta de que Ramanujan tenía que estar en lo cierto, ya que, según él, «nadie puede ser tan creativo como para hacer que algo así funcione cien veces a menos que sepa que siempre es correcto». Ono cerró los ojos y trató de averiguar qué era lo que Ramanujan había comprendido que nadie más había logrado entender hasta entonces.

Las formas modulares están plagadas de congruencias: relaciones del mismo tipo que las que Ramanujan había observado en los números de partición. Mientras contemplaba las seis ecuaciones, a Ono se le ocurrió que, si pensaba en la función de partición como en una forma modular disfrazada, podía demostrar que las ecuaciones eran ciertas.

Otra idea siguió de inmediato: con unos pequeños ajustes, las teorías sobre formas modulares que él mismo había desarrollado podían utilizarse no solo como una herramienta para poner a prueba el genio de Ramanujan, sino también para sacar a la luz otros secretos de la función de partición. «Era como tener un telescopio nuevo», recuerda Ono. «Una vez que dispones de él, al contemplar el firmamento aparecerán muchas galaxias nuevas.»

Así, Ono logró demostrar que, en los números de partición, las relaciones de congruencia no eran algo tan poco común. Los expertos habían dado por sentado que solo habría unas pocas más, aparte de las conocidas de módulo 5, 7 y 11. Sin embargo, Ono demostró que existía una infinidad de ellas.

Aunque la comunidad lo consideró un descubrimiento de primer orden, Ono no estaba plenamente satisfecho. A pesar de haber demostrado que las congruencias eran algo habitual en los números de partición, no había sido capaz de predecir con exactitud dónde encontrarlas. Al ordenar los números de partición, lo ideal sería saber con qué frecuencia va a aparecer una relación de congruencia. Al observar una, ¿puede decirse cuándo aparecerá la siguiente? Ono no tenía ninguna pista al respecto.

Cuando se enfrenta a un problema, Ono se niega a darle vueltas de forma obsesiva. Lo aparta en algún rincón de su cabeza, junto a otras cuestiones sin resolver, hasta que resurge. El problema de predecir las congruencias en los números de partición estuvo hibernando durante cinco años, hasta que el investigador posdoctoral Zachary A. Kent llegó a Emory en la primavera de 2010. Un día, el asunto apareció durante una conversación y, antes de que se dieran cuenta, se encontraron trabajando en ello casi sin pausa: en la oficina, tomando café y durante los paseos por los bosques del norte de Atlanta.

Poco a poco, construyeron una estructura laberíntica en la que los números de partición podían ordenarse con gran eficiencia. La descubrieron gracias a un tipo de herramienta que los matemáticos denominan operador. En concreto, el suyo tomaba un número primo (el 13, pongamos por caso), seleccionaba sus potencias (13^2, 13^4, etcétera) y las dividía en números de partición. Para su sorpresa, los números así obtenidos generaban una estructura fractal, con patrones casi idénticos que se repetían a distintas escalas, como ocurre en un copo de nieve. Su resultado demostró que los números de partición no se reducían a una serie aleatoria con algunas simetrías accidentales, sino que poseían «una bella estructura interna», en palabras de Ono, que los hacía más predecibles e interesantes.

Ono, Kent y Amanda Folsom, de Yale, trabajaron durante meses para afinar los detalles de su nueva teoría. Al final, pudieron demostrar que los números de partición seguían congruencias calculables. Estas existen para cada primo y para cada potencia de un primo. A partir del 11, sin embargo, tales pautas se

tornan mucho más complejas, lo que tal vez explique por qué Ramanujan no las vio.

Ono y sus colaboradores presentaron sus hallazgos en 2011, durante un simposio en Emory. Al terminar, el correo electrónico de Ono estaba repleto de mensajes de felicitación. «Se trata de un descubrimiento espectacular y sorprendente», sostiene George E. Andrews, experto en números de partición de la Universidad de Pensilvania. «No creo que Ramanujan soñase jamás con algo así.»

RESPUESTAS ELEGANTES

Las investigaciones sobre la obra de Ramanujan han llevado a Ono a realizar otros descubrimientos cuyas aplicaciones potenciales podrían ir más allá de la matemática pura. Al combinar la intuición de Ramanujan con las matemáticas modernas, Ono y sus colaboradores han hallado nuevas herramientas de cálculo que, tal vez, deriven en mejores técnicas para cifrar datos o permitan profundizar en las propiedades de los agujeros negros.

Junto con Jan Bruinier, de la Universidad Técnica de Darmstadt, Ono ha desarrollado una fórmula para calcular números de partición de forma rápida y precisa: el santo grial que Ramanujan nunca encontró y al que Ono ha decidido bautizar como «el oráculo». Además de para calcular números de partición, dicha herramienta puede también usarse para estudiar un tipo particular de curvas elípticas.

Los expertos en criptografía emplean curvas elípticas para generar algoritmos de cifrado [*véase* «El legado de Évariste Galois», por Antoine Chambert-Loir; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 2013]. El éxito de un esquema criptográfico depende de su capacidad para generar rompecabezas que no puedan resolverse en un tiempo razonable. Uno de los algoritmos más usados, el popular RSA, se basa en lo difícil que resulta factorizar con rapidez el producto de dos primos. Los métodos más modernos emplean puntos en curvas elípticas, cuyas relaciones resultan aún más complejas. Si el descubrimiento de Ono o algún hallazgo similar hiciese emerger conexiones aún más escurridizas, el resultado podría aprovecharse para crear sistemas de cifrado más seguros.

El trabajo de Ono también ha revelado uno de los mayores misterios del legado matemático de Ramanujan. Tres meses antes de morir, postrado en la cama con fiebre y dolores, el indio escribió una última carta a Hardy, en Inglaterra: «Lamento profundamente no haberle escrito hasta ahora», se disculpaba. «Hace poco que he descubierto una clase de funciones, a las que llamo funciones theta "de imitación" [*mock theta functions*], las cuales entran en las matemáticas de un modo tan bello como las funciones theta ordinarias.»

Las funciones theta son, en esencia, formas modulares. Ramanujan conjeturó que era posible definir una serie de funciones que, sin guardar ningún parecido con las formas modulares ordinarias, se comportarían de una manera muy parecida a estas cerca de una singularidad. Los matemáticos denominan «singularidades» a aquellos puntos en cuya vecindad los valores de una función crecen rápidamente hacia infinito. La función $f(x) = 1/x$, por ejemplo, tiene una singularidad en $x = 0$, ya que, a medida que x toma valores más y más próximos a 0, $f(x)$ crece sin límite. Las formas modulares poseen un número infinito de singularidades. Ramanujan intuyó que, para cada forma modular, debía existir una función «imitadora» que no solo tuviese las mismas singularidades, sino que, en ellas, tendiese a infinito casi al mismo ritmo que las funciones originales.

Hubo que esperar hasta 2002 para que Sander Zwegers, por entonces en la Universidad de Utrecht, definiese formalmente funciones theta de imitación, para lo cual se basó en ideas perfiladas tras la muerte de Ramanujan. Aun así, nadie alcanzaba a explicar la afirmación de Ramanujan de que, cerca de una singularidad, dichas funciones se comportarían casi igual que las formas modulares.

El oráculo de Ono y Bruinier permitió resolver el rompecabezas. Junto con Folsom y Robert Rhoades, de Stanford, Ono derivó una serie de ecuaciones que calculaban el valor de las funciones theta de imitación cerca de las singularidades. Y, de hecho, pudieron comprobar que la conjetura de Ramanujan era cierta: su resultado reproducía con un excelente grado de aproximación el valor de las formas modulares cerca de las mismas singularidades. En un caso concreto, por ejemplo, la diferencia entre una y otra se hallaba muy cerca de 4: una desviación casi insignificante en este universo de números infinitos.

Hace poco, los físicos han comenzado a usar las funciones theta de imitación para estudiar una de las propiedades más enigmáticas de los agujeros negros: su entropía. Algunos expertos creen que ciertas fórmulas similares a las de Ono podrán ayudarles a sondear el fenómeno con mayor precisión.

Ono reconoce que su trabajo tal vez no posea muchas aplicaciones prácticas. Pero, al igual que no pocos teóricos, opina que no es la utilidad lo que hace importantes a este tipo de descubrimientos. Los grandes hallazgos, argumenta, son majestuosos per se, del mismo modo que lo es un cuadro o una sonata. «Los teoremas de Ken no van a darnos una fuente de energía limpia ni van a curar el cáncer», admite Andrews. Muy a menudo, el papel de las matemáticas en el desarrollo científico o técnico tarda décadas en hacerse patente. Resulta muy difícil, si no imposible, predecir cuáles serán esos hallazgos.

Ono no ha olvidado el placer que le produjo contemplar por vez primera las congruencias de Ramanujan ni la mano firme de su padre copiando aquellos símbolos desconocidos en un cuaderno amarillo. «¿Por qué solo tres?», recuerda haber preguntado. «Nadie lo sabe», obtuvo como respuesta.

Ono rememora la historia sentado en el salón de su casa de Georgia. Tras él, enmarcada y colgada en la pared, hay una foto del busto de bronce de Ramanujan encargado para su viuda y financiado por las donaciones de 25 dólares que, como el padre de Ono, aportaron cientos de matemáticos y científicos de todo el mundo. «Ni en mis sueños más locos llegué a imaginar que un día podría decirle a mi padre: "¿Sabes qué? Esas tres congruencias no son las únicas. Ni muchísimo menos".»

PARA SABER MÁS

Srinivasa Ramanujan. James R. Newman en *Scientific American*, junio de 1948.

***l*-adic properties of the partition function.** Amanda Folsom, Zachary A. Kent y Ken Ono en *Advances in Mathematics*, vol. 229, n.º 3, págs. 1586-1609, febrero de 2012.

Ramanujan's mock theta functions. Michael Griffin, Ken Ono y Larry Rolen en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 110, n.º 15, págs. 5765-5768, abril de 2013. Disponible en **www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3625272**

EN NUESTRO ARCHIVO

Descifrado un enigma de un siglo de antigüedad. Davide Castelvecchi en *IyC*, julio de 2011.

por Marc Boada Ferrer

Marc Boada Ferrer es divulgador científico y experto en ciencia experimental.



Agricultura científica

Aderezada por conocimientos químicos y botánicos, la horticultura nos proporciona materiales para múltiples experimentaciones

Un largo invierno trabajando en el laboratorio, bajo la luz artificial, puede dejar al experimentador con cierto déficit de serotonina. Pero, llegado el buen tiempo, puede recuperarse trasladando su actividad al exterior. Una buena forma de hacerlo es experimentando en el campo de la botánica comestible.

Tomemos un trozo cualquiera de tierra y aportemos algún material orgánico parcialmente descompuesto. Plantemos luego todo tipo de verduras y hortalizas. El resultado: un huerto. Invitemos ahora a amigos y conocidos y escuchemos sus comentarios. Con un poco de suerte, alguien nos preguntará si se trata de un huerto orgánico, ecológico, biodinámico o permacultural. No nos asustemos. Orgánico es todo lo vivo y ecológico es algo cultivado solo con productos naturales. Menos debe extrañarnos que lo tilden de biodinámico, ya que todo lo que medra en un huerto se halla en cambio continuo; y si no comprendemos lo que significa permacultural, tampoco debemos sufrir, ya que el significado es tan amplio que incluye también lo que aquí nos interesa, la horticultura científica, basada en la experimentación sistemática y reproducible.

Gracias al cúmulo de conocimiento generado durante siglos, y en especial en estas últimas décadas, hoy sembrar y cultivar plantas es una ciencia perfectamente establecida; sería imposible alimentar a la creciente población mundial sin la estrecha colaboración de la industria química con el sector agroalimentario. El resultado es que la agricultura a gran escala utiliza necesariamente un amplio abanico de sustancias que permiten abonar el suelo, controlar plagas y aumentar espectacularmente la producción. Sin embargo, para nuestros fines experimentales o didácticos intentaremos ser autosuficientes en cuanto a fertilizantes y enmiendas.

Además, lo que nos proponemos va más allá de un simple cultivo de hortalizas. Nuestro huerto puede proporcionarnos esencias, pigmentos, indicadores de acidez o alimentos para el terrario o el aviario. Nos permitirá asimismo cultivar especies locales y descubrir los secretos del desarrollo vegetal y, por añadidura, del animal (no olvidemos que entre nosotros y nuestras lechugas se interpone todo tipo de artrópodos, aves y algunos mamíferos, también ansiosos, de hincar el diente a unas sabrosas verduras). Aún más, no solo el mundo vivo puede alterar nuestra cosecha: también los factores meteorológicos, astronómicos, geológicos y topográficos, por citar algunos, marcarán en buena medida el ritmo de nuestra experimentación hortícola.

Así pues, localicemos un espacio donde cultivar: en el patio de la escuela, en el jardín hasta ahora ocupado solo por un verde césped, en la terraza o incluso en el balcón. Recordemos que vamos a criar organismos fotosintéticos y, por tanto, cuantas más horas de sol reciba ese lugar mejor que mejor. (A excepción de un terreno muy umbrío y de cara al norte, casi cualquier orientación será aprovechable). Dado que nos proponemos crear un espacio donde cultivar un máximo de plantas en un mínimo de superficie, sin duda la mejor estrategia pasará por disponer de una tierra muy fértil y esponjosa. De esta forma, el sistema radicular de la planta, que alimentará al organismo entero, podrá desarrollarse a placer.

Hoy está en boga una expresión que define bien esa disposición de cultivo: el «bancal profundo» o «fértil». En esencia, consta de un largo espacio excavado hasta una profundidad de 40 o 50 centímetros, de dos o tres metros de ancho y tan largo como se quiera —eso sí, de hacerlo muy largo deberemos andar mucho para rodearlo—. Unas dimensiones interesantes, de cara a evaluar el rendimiento por unidad de superficie, corresponden a un bancal de dos por cinco metros. Sea como sea, deberemos tener algo muy en cuenta: una vez cavado a fondo y aderezada la tierra con aquello que fuere necesario, nunca jamás la volveremos a pisar. El objetivo es conservar su estructura, ligereza y permeabilidad al riego.

Marquemos, pues, el perímetro del bancal utilizando piquetas y un cordel tenso y nivelado. Retiremos, con la azada, la capa de césped que pueda haber y excavemos a fondo a partir de un frente inicial. Dejemos la tierra provisionalmente a un lado de la zanja. En pocas horas, la cubeta estará a punto y podremos observar la sección del suelo. Miremos bien. Se trata de algo que habrá de darnos desde satisfacciones hasta muchos quebraderos de cabeza.

ECOSISTEMA HORTÍCOLA muy simplificado. Su riqueza faunística es impresionante: abarca desde el sustrato geológico ❶, lentamente alterado, hasta la fértil tierra del bancal ❷. En las profundidades habitan todo tipo de microorganismos, lombrices ❸ y el topo ❹, especie indicadora de biodiversidad. En la superficie, junto a hongos y levaduras, encontramos el puerro ❺, de tallo profundo y comestible, y las habas ❻, en cuyas raíces crecen nódulos de bacterias simbiontes fijadoras de nitrógeno ❼. Los moluscos como el caracol común ❽ o los anfibios como el sapo ❾ habitan en las zonas umbrías, bajo las hojas de las acelgas ❿ y las lechugas ⓫. Mas allá, en la zona expuesta al sol, medran plantas heliófilas como las cebollas ⓬, con un tallo engrosado de delicioso sabor, y las zanahorias ⓭, de las que, tanto nosotros como diversos artrópodos, comemos la raíz. El horticultor científico no solo aporta nutrientes y semillas, procura también una biodiversidad suficiente y monitoriza algunos parámetros fisicoquímicos como el *p*H, que mide con una sonda y un voltímetro ⓮.

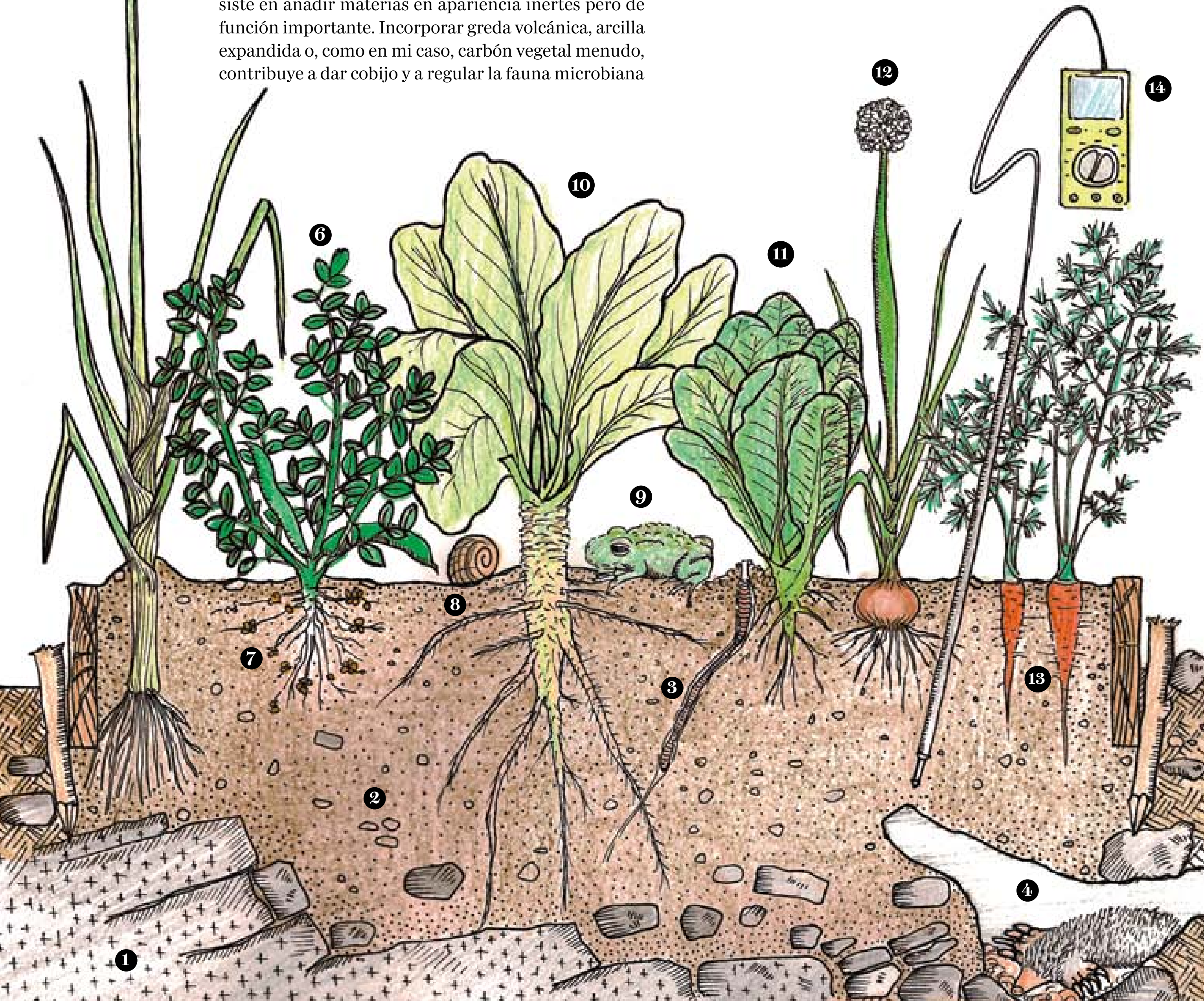
MARC BOADA (*todas las ilustraciones*)

Cada suelo es distinto. Los hay antropogénicos, fruto del relleno con derrubios de antiguos relieves topográficos; son propios de las regiones urbanas y sus periferias. Fuera de estos, que deberán ser renovados en casi su totalidad, los suelos suelen ser calcáreos, arenosos, arcillosos y más o menos orgánicos. Estos últimos son óptimos para el cultivo, pero los otros deben ser corregidos con enmiendas.

Si la tierra es demasiado arcillosa, deberemos añadir materiales que aumenten su permeabilidad (tanto al agua como al aire); si, además, su contenido orgánico es reducido, la abonaremos en profundidad. Añadiremos, pues, cal, arena y mucha materia orgánica. Algo parecido, pero inverso, sucede con un sustrato arenoso: tendremos que acondicionarlo con turba, humus o sustrato comercial. Finalmente, en muchos puntos de la península encontraremos terrenos calcáreos, en los que el *p*H es notablemente alcalino. Las enmiendas tenderán a neutralizarlo, aportando compuestos ligeramente ácidos como la gallinaza madura o heces de caballo, que nos pueden suministrar de forma gratuita en cualquier granja o hípica vecina. Otra estrategia consiste en añadir materias en apariencia inertes pero de función importante. Incorporar greda volcánica, arcilla expandida o, como en mi caso, carbón vegetal menudo, contribuye a dar cobijo y a regular la fauna microbiana que se desarrollará en el suelo abonado. Más aún, siempre arrojaremos a nuestra tierra tanta materia orgánica como podamos. Un buen compost es la primera opción. La viruta de madera de la carpintería más próxima resulta óptima para incrementar suavemente el *p*H y los recortes de la segadora de césped (convenientemente dosificados) también sirven.

Hasta aquí, lo que siempre se había hecho, al menos hasta la revolución industrial. Pero si hoy queremos llevar a cabo una auténtica agricultura científica, deberá interesarnos la composición química de nuestra tierra, la cual podemos analizar con un pequeño equipo de jardinería.

Nitrógeno, potasio, fósforo y otros elementos son imprescindibles para el desarrollo vegetal. Recordemos que en el centro de la molécula de clorofila se aloja un átomo de magnesio, y que los aromas y colores de nuestras verduras se deben a compuestos de gran complejidad química. Por todo ello, aportaremos cenizas de madera o granito descompuesto, ricos en potasio; huesos calcinados, para aportar fósforo, y desechos con un buen tenor de nitrógeno como los restos de coci-



na, deposiciones animales o abono verde (una mezcla de plantas ricas en nitrógeno). Mezclaremos bien todos esos materiales junto con la tierra y eliminaremos las piedras y otros estorbos de granulometría gruesa que pueda haber. En ocasiones resulta más práctico cerner toda la tierra. He usado una malla cuadrada de 20 milímetros de paso y el resultado es un material excelente, apto para cultivos de raíz, como las zanahorias.

Hecho todo esto y rellenada la zanja, la dejaremos en reposo unas semanas, para que maduren conjuntamente los componentes y empiece a desarrollarse un suelo fértil. Puede resultar interesante medir su temperatura, que aumentará en función de la cantidad de materia orgánica fermentable que hayamos incluido. Lo que es seguro es que deberemos medir el *p*H con cierta precisión. El objetivo es garantizar que es casi neutro, ya que entonces la mayoría de los vegetales se desarrollan bien.

Hay distintos métodos. Sin embargo, la mayoría son lentos o muy costosos. Intentado acelerar el proceso de medida y contentándome con una baja precisión construí un peachímetro sencillo y eficaz. Consiste en un arreglo de dos electrodos: una pequeña varilla de zinc introducida en un delgado tubo de aluminio; entre ambos se sitúa un aislante y luego se conectan a un voltímetro con una alta resistencia interna. Cuando los electrodos se clavan en el suelo húmedo, este funciona como un electrolito que cierra el circuito, produciéndose cierta fuerza electromotriz. En un medio ácido, el zinc hace de polo negativo; en uno más básico, de polo positivo. Una vez calibrado con algunas soluciones patrón, nos proporcionará una medida aproximada, pero suficiente.

Cabe destacar que, al principio, la inversión en esfuerzo es notable; el experimentador debe trabajar duramente para dejar la tierra a punto. Pero luego llega el momento más emocionante: el inicio del cultivo. Podremos escoger entre decenas de especies y centenares de variedades. Centrémonos en aquello por lo que sentimos predilección, ya sea desde el punto de vista culinario o puramente práctico. Busquemos ahora información sobre las especies escogidas y tracemos un plan de plantación atendiendo a algunos parámetros esenciales: momento climático óptimo para la siembra, porte de la planta, requerimientos nutritivos y asociaciones favorables. Desgranemos estos conceptos.



CULTIVO EXPERIMENTAL DE MAÍZ en bancal profundo. Distintas variedades se someten a las mismas condiciones climáticas, modificando a veces la composición del suelo. Ello permite inferir interesantes datos, como la adecuación a un lugar concreto, el índice de germinación, el ciclo de cultivo y, en última instancia, el rendimiento de la variedad.

Plantaremos cada especie en la estación oportuna, teniendo en cuenta las particularidades climáticas del lugar donde nos encontremos. En las cálidas regiones mediterráneas, y tan pronto tengamos garantías de que las heladas ya han terminado, podremos sembrar sin tregua. En las frías montañas de clima atlántico, en cambio, deberemos esperar algunas semanas más, ya que la tierra permanece fría hasta muy entrada la primavera. Dispondremos las plantas de porte alto en la zona norte del bancal y ante estas las más menudas, que gozarán allí de la mejor insolación. También intentaremos que plantas con requerimientos nutritivos similares compartan bancal. Así, especies que medran cómodamente en terrenos alcalinos pueden coexistir en el mismo espacio; otras que prefieren sustratos más ácidos, las plantaremos juntas y ajustaremos el *p*H para que crezcan sanas y fuertes. Respecto a las asociaciones favorables, podemos explorar, temporada tras temporada, algunas combinaciones interesantes. Por ejemplo, un pequeño sembrado de maíz, planta exigente desde el punto de vista de los nutrientes, puede ser a la vez un magnífico campo de tutores para guisantes, ya que estos aportarán el nitrógeno característico de las leguminosas y a su vez sus zarcillos, enrollándose sobre la gramínea, elevarán la planta hasta la luz.

Es impensable resumir en esta corta colaboración todo el saber hortícola que cualquier agricultor profesional posee. Con todo, sí es posible animar al científico aficionado a que extienda sus actividades a esta extraordinaria área de conocimiento. El éxito es muy accesible, el resultado agradabilísimo y solo hay un secreto: plantar mucho y con sentido común, estudiando primero las características de las especies seleccionadas, trazando el esquema de plantación mencionado y, atención, anotando sistemáticamente todo lo que se hace. La libreta de laboratorio es esencial. Las temporadas se suceden con rapidez, algunas variedades resultan decepcionantes y otras de gran producción. La química de cada bancal puede ser modificada a voluntad y las mismas semillas germinan en unos de forma espectacular y en otros permanecen aletargadas durante semanas, o nunca llegan a brotar. Solo un registro cuidadoso nos permitirá

minimizar la repetición de los errores y mejorar temporada tras temporada.

También podremos aumentar las estrategias. Resulta muy práctico disponer de un cajón de germinación, una simple caja rellena con nuestra mejor tierra, abrigada del frío con una tapa transparente, que producirá un notable efecto invernadero. Resultado: las plántulas aparecen a una velocidad espectacular y semanas antes que a cielo raso. Comprobaremos que cada una de ellas puede ser replantada diversas veces, ya sea como resultado de una entresaca realizada en un semillero ya muy lleno o para llevarlas a bancales de mantenimiento, donde pueden esperar unas semanas al trasplante definitivo.

Todo ello requiere ajustar la densidad de plantación, para conseguir, como decíamos, el máximo número de plantas en la mínima superficie. Si trabajamos sobre un bancal profundo podemos sembrar bastante más tupido que en la práctica tradicional; pero sin pasarnos, ya que entonces la falta de sol y ventilación induce la aparición de podredumbres, hongos y babosas. Por otro lado, sembrar con una alta densidad facilita la lucha contra las malas hierbas, un asunto que nos ocupará permanentemente. En efecto, las plantas oportunistas aparecerán por doquier y crecerán muy rápido, tanto, que las especies lentas quedarán en desventaja. Por añadidura, las especies espurias son voraces consumidoras de los nutrientes que con tanto esfuerzo hemos aportado; por tanto, las eliminaremos de forma sistemática, con el rastrillo o a mano. Aquellos que hayan preparado su propia tierra, mezclando materias «puras» (arena, cal, turba, ceniza o compost maduro) exentas de semillas fértiles, lo agradecerán.

Año tras año, el aporte orgánico eleva el bancal, que puede ser contenido mediante unos maderos perimetrales, piedras u obra de fábrica. Los cultivos se suceden y el experimentador equilibra el consumo de los nutrientes básicos mediante una rotación sistemática de las especies. A lo que fue patatal ácido rico en potasio siguen las tomateras. Las leguminosas, que enriquecen el suelo con nitrógeno, preceden a las crucíferas, que lo necesitan en abundancia. Las plantas de raíz profunda se siembran en bancales ya muy maduros, con enmiendas perfectamente integradas, muy limpios de piedras, que en la siguiente cosecha podrán alojar unas espectaculares liliáceas, como las cebollas.

Mientras, habremos aprendido a luchar contra la fauna local. En las zonas montuosas y feraces protegeremos el huerto con una sólida valla ganadera, capaz de resistir el embate de jabalíes o corzos. En las áreas húmedas y fértiles aprenderemos a amar a los topillos, aunque consumirán sin cuento la población de uno de los grandes amigos del creador de jardines comestibles, el gusano de tierra, un anélido que fertiliza las zonas profundas de los bancales, aireando y digiriendo todo tipo de residuos. Algunos experimentadores sufren el ataque frecuente de pájaros voraces, que desentierran hasta las últimas semillas que delicadamente se habían sembrado, o consumen todo tipo de frutas, que deberemos proteger con mallas perfectamente fijadas so pena de verlas en casa del vecino después de la primera tormenta.



DETALLE DE UNA SONDA CASERA para la estimación del *p*H del suelo. Consta de una varilla de zinc aislada con epóxido e introducida en un tubo de aluminio (dos electrodos separados por un aislante). Al clavar la sonda en la tierra húmeda (que opera a modo de electrolito), aparece entre los electrodos una diferencia de potencial que, medida con un voltímetro, permite inferir la acidez o alcalinidad del terreno.

A estas alturas también estaremos controlando otro factor esencial para el desarrollo vegetal: la humedad y el riego. Una vez más, la climatología marcará la estrategia para gozar de unas verduras bien lozanas. Las zonas secas van a necesitar un riego constante; en las regiones húmedas, en cambio, este puede ser esporádico. En ambos casos deberemos controlar la humedad, para evitar un exceso de riego que se traducirá en un lavado del sedimento, la aparición de eflorescencias y costras o la proliferación de enfermedades fúngicas. Por eso vale la pena medir la humedad del suelo a distintas profundidades. Podemos hacerlo con una sonda similar a la que hemos pergeñado para el *p*H, pero con electrodos de zinc y acero inoxidable; ofrecerá todavía menor precisión, pero nos permitirá intuir cuál es la humedad a un par de palmos de profundidad.

Es importante minimizar el estrés hídrico de las plantas, ya que puede acelerar la floración o disminuir el crecimiento. En la ciudad, donde podemos criar buenos tomates en un balcón mediante una mesa de cultivo o unos buenos tiestos, corremos el riesgo de regar con agua excesivamente clorada; la dejaremos en reposo unos pocos días, en un bidón tapado con una malla. En otros sitios es la escasez la que preocupa; entonces deberemos captar hasta las últimas gotas de lluvia, regar a mano y proteger el suelo desnudo con un mantillo que impida su secado.

Quizás es en las zonas áridas donde mayor importancia reviste la experimentación junto a la recuperación de las técnicas tradicionales de cultivo. Pensemos en las secas regiones del sur europeo. Allí, el fértil bancal profundo, bien regado por abundantes lluvias, es casi un espejismo. Se imponen técnicas espartanas, cubetas u hornacinas en el fondo de las cuales se asienta la planta, que se abona justo en el pie. Protegidas así de los vientos dominantes, reducen la pérdida de agua; y, en caso de lluvia, recogen una cantidad mayor de precipitación. La selección de los ejemplares que muestran mayor vigor ha conducido a variedades especialmente adaptadas a estos climas extremos.

El huerto se convierte, pues, en algo más que un sistema racional de producción de alimentos. Es un pequeño jardín botánico, un espacio para el desarrollo de los sentidos y la percepción fina, un reducto de naturaleza creado por el científico.

por Bartolo Luque



Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.

Ars combinatoria

Un recorrido por la combinatoria y el azar en la creación artística

Arthur C. Clarke escribió en 1953 un cuento de ciencia ficción titulado *Los nueve mil millones de nombres de Dios*. En él, unos monjes tibetanos adquieren una computadora Mark V para un proyecto en el que han estado trabajando durante tres siglos: «Una lista que contendrá todos los posibles nombres de Dios [...] con no más de nueve letras en un alfabeto que hemos ideado». Si desean saber qué se proponían con ello los religiosos, tendrán que leer el relato. Sin embargo, sí les adelantaré que uno de los aciertos del cuento es el maridaje que hace Clarke entre la tecnología de cómputo de la época y una arcana tradición mística que, a partir de procedimientos combinatorios, buscaba revelar conocimiento hermético.

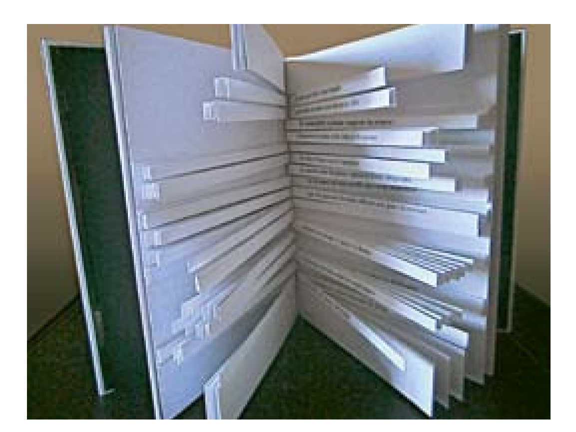
El ejemplo conocido más antiguo de tales métodos lo hallamos en el *I ching*, o *Libro de los cambios*: un método de adivinación, u oráculo mecánico, basado en una mezcla de azar y sistema binario. De origen chino, data del primer milenio antes de nuestra era. El equivalente en nuestra cultura es el texto místico hebreo *Séfer Ietzirá*, o *Libro de la Creación*. Escrito hacia el siglo II, nos explica que «el Uno Infinito» creó el mundo permutando letras y números. Más tarde, la obra se convertiría en objeto de estudio por parte de los cabalistas, cuya actividad floreció en España y Francia en el siglo XIII.

Fue por aquella época cuando el cabalista sefardí Abraham Abulafia concibió su «ciencia de la combinación» en el marco de la gematría, y el excéntrico Ramon Llull, su *Ars magna*, descrita a menudo como precursora de la moderna lógica simbólica y los ordenadores. La influencia de Llull puede rastrearse a través de los tiempos, pasando por el *Ars magna sciendi sive combinatorica*, de Athanasius Kircher, la obra de Descartes o la de Leibniz, con su propia *Ars combinatoria*. Finalmente, el método mudó de lo místico a lo formal con George Boole y Charles Babbage, cuyos trabajos marcarían el nacimiento de los ordenadores: máquinas para el *ars combinatoria*.

Pero esa tradición arcana continúa viva en el imaginario y el arte contemporáneos. Jorge Luis Borges hace claras referencias al *Séfer Ietzirá*, la cábala y la noción medieval del mundo como un libro en su célebre —y tan querido por los matemáticos— *La biblioteca de Babel*. En su poema *El golem*, dedicado al engendro humanoide creado por medios que incluían la permutación de números y letras, el argentino escribe:

Y, hecho de consonantes y vocales,
habrá un terrible Nombre, que la esencia
cifre de Dios y que la Omnipotencia
guarde en letras y sílabas cabales.

Borges juega en su obra con el concepto de «alfabeto creador», la idea de que la mera combinación de símbolos permita generar vida. Si le parece algo estrambótico, piense en la tabla periódica de los elementos, en las bases del ADN o en las líneas de código de la inteligencia artificial.



CENT MILLE MILLIARDS DE POÈMES, **de Raymond Queneau, fue reeditada en 2012 por la mítica editorial Gallimard. En 2011, para celebrar su quincuagésimo aniversario, la editorial Demipage lanzó *Cien mil millones de poemas*, en la que participan 10 autores con 10 sonetos en lengua castellana. El formato es idéntico al original, excepto que se ha añadido una página con 14 lengüetas en blanco para que el lector se convierta en el poeta número 11.**

Restricciones fecundas

Más allá de la tradición mística como tema, el arte también ha incorporado la combinatoria en formas y procedimientos de creación. Para entender qué es la literatura combinatoria, nada mejor que un ejemplo canónico (en traducción libre) de los poemas proteicos de Georg-Philipp Harsdörffer, poeta y traductor alemán del siglo XVII, que aparecieron por primera vez en *Deliciae physico-mathematicae*, de su compatriota Daniel Schwenter:

Honor, arte, dinero, bien,
amor, mujer y niño.
El hombre los ha buscado,
sentido, esperado y perdido.
Arte, honor, bien, dinero,
mujer, amor y niño.
El hombre los ha sentido,
esperado, buscado y perdido.
Dinero, arte, honor...

El poema se desarrolla permutando los siete sustantivos y los cuatro participios, lo cual proporciona la friolera de $7! \cdot 4! = 120.960$ pareados que, en alemán, mantienen la métrica y la rima.

Los métodos en poesía pueden ser muy imaginativos. Uno de mis favoritos es el poema *Sweethearts*, que Emmett Williams publicó en 1967. Williams, uno de los fundadores de Fluxus, nos propone una matriz de 11×11 letras en la que cada fila contiene la palabra *sweethearts* («amantes»). Al eliminar ciertas letras de esa matriz y mantener en su posición las restantes, pueden obtenerse palabras y frases que, encadenadas, forman un poema:

s w e e **t h e** a r t s	s w e e **t h e** a r t s	s w e e **t h e** a r t s
s w **e** e t h e **a** r t s	**s w e e t h e a r t s**	**s w e e t h e a r t s**
s w **e e t h e** a r t **s**	**s** w **e e t h e** a r t s	**s** w **e e** t h e a r t s
s w e e t h e a r t s	s w e e t h e **a** r t **s**	**s** w e e **t** h e **a r** t **s**
s w e e t h e a r t s	s w e e **t h e** a r t s	s w e e t h e a r t s
s w e e t h e a r t s	**s** w **e** e t h e **a** r t s	s w e e t h e a r t s
s w e e t h e a r t s	**s** w **e e t h e** a r t **s**	s w e e t h e a r t s
s w e e t h e a r t s	s w e e t h e a r t s	s w e e t h e a r t s
s w e e t h e a r t s	s w e e t h e a r t s	s w e e t h e a r t s
s w e e t h e a r t s	s w e e t h e a r t s	s w e e t h e a r t s
s w e e t h e a r t s	s w e e t h e a r t s	s w e e t h e a r t s

TRES EJEMPLOS de la matriz de 11 × 11 con las letras de la voz inglesa *sweethearts* («amantes») ideada por Emmet Williams en 1967. La selección de ciertas letras permite generar versos que, encadenados, componen un poema con pleno sentido.

The sea seethes
The sweethearts seethe as the sea seethes
The sweethearts see stars
Stars sea
The war starts

(«El mar hierve / Los amantes hierven como hierve el mar / Los amantes ven estrellas / Estrellas de mar / La guerra comienza»). Dadas las restricciones, la coherencia del poema no deja de resultar asombrosa. *Sweethearts* me recuerda la famosa frase de Miguel Ángel a propósito de su *David*: «David ya estaba dentro de ese bloque, yo tan solo quité lo que sobraba».

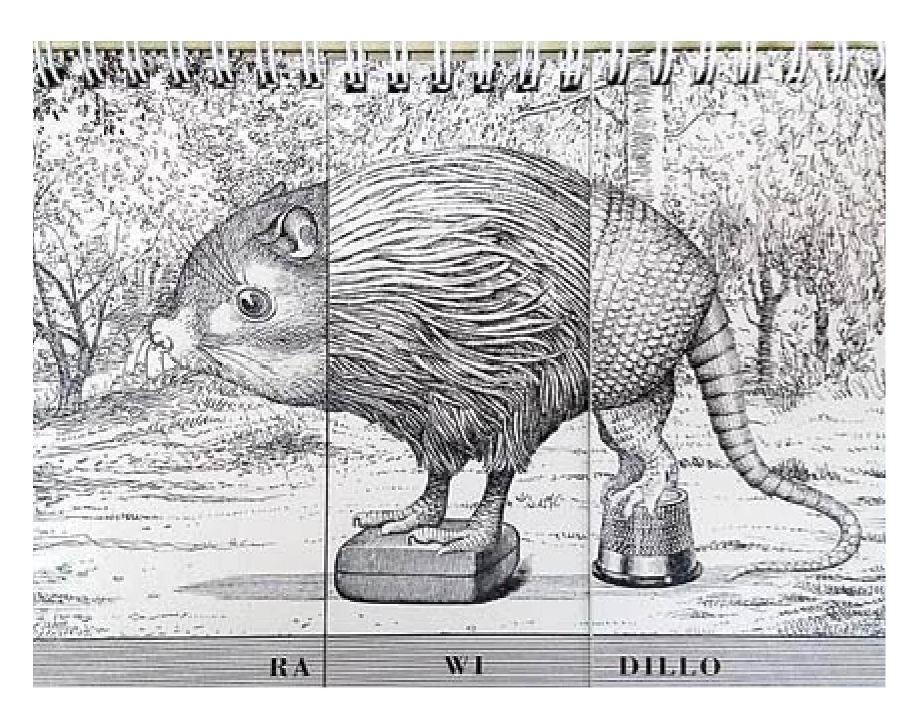
El elenco de poetas contemporáneos que han usado el arte combinatorio en alguna de sus formas no es exiguo: Jackson Mac Low, Alison Knowles, Joan Retallack, Charles O. Hartman, Ron Silliman, Jim Rosenberg, Eugen Gomringer, Eduardo Kac, Louis Zukofsky... Con todo, los campeones han sido sin duda los componentes del grupo Oulipo, creado en 1960 por el matemático François Le Lionnais y al que pertenecieron, entre otros, George Perec, Marcel Duchamp e Italo Calvino.

No en vano, el modelo de Oulipo fue Bourbaki, el grupo de matemáticos que en los años treinta del siglo xx se propuso fundamentar la matemática en su conjunto. Bourbaki empleaba el método axiomático; Oulipo, la restricción. En palabras de Marcel Bénabou y Jacques Roubaud, dos de sus fundadores: «¿Y qué es un autor oulipiano? Es una rata que construye ella misma el laberinto del cual se propone salir. ¿Un laberinto de qué? De palabras, sonidos, frases, párrafos, capítulos, bibliotecas, prosa, poesía y todo eso».

Uno de los componentes más célebres de Oulipo, el patafísico, novelista y poeta surrealista Raymond Queneau, escribió en 1961 un libro de poesía titulado *Cent mille milliards de poèmes* («Cien mil millardos de poemas»). Un millardo son mil millones, el equivalente al confundeperiodistas *billion* inglés. Queneau, con la colaboración del diseñador Robert Massin, creó un libro que operaba como una máquina de permutaciones.

Su poemario constaba de 10 páginas, cada una con un soneto (14 versos endecasílabos). La maravilla consistía en que el lector podía generar sus propios sonetos siguiendo unas sencillas instrucciones: cada verso estaba escrito en una lengüeta, por lo que el primero podía escogerse al azar de entre cualquiera de los primeros versos de los 10 sonetos del libro; el segundo, de entre cualquiera de los segundos versos, y así sucesivamente. Al completar de esta manera los 14 versos, el número de sonetos posibles asciende a 10^{14}: en efecto, 100.000 millardos de poemas. Queneau nos asegura, además, que todos ellos tienen sentido.

Esa hazaña convirtió a Queneau, con una sola obra, en el poeta más prolífico de la historia. Como él mismo calculó: «Contando 45 segundos para leer un soneto y 15 para cambiar las lengüetas, 8 horas al día y 200 días al año, tenemos más de un millón de siglos de lectura». Una pre-



EN EL PREFACIO de *Cent mille milliards de poèmes*, Quenau confiesa que la obra está inspirada en un libro infantil titulado *Têtes de rechange*. En 2003, la mexicana Fondo de Cultura Económica publicó el *Animalario universal del profesor Revillod*, con textos de Miguel Murugarren e ilustraciones de Javier Sáez Castán. Consta de 16 láminas de animales de estilo naturalista. Cada una ha sido dividida en tres pestañas, lo que permite construir hasta $16^3 - 16 = 4080$ quimeras. Por ejemplo, al tomar la cabeza de un ratón, el cuerpo de un kiwi y la trasera de un armadillo, obtenemos el «Rawidillo: gracioso animalito de hábitos nocturnos de la región del Orinoco».



CÓMIC CÚBIK es una creación de Paco Mir, uno de los componentes del famoso grupo de teatro Tricicle. Editada por Thule en 2013, consta de nueve cubos con textos ilustrados en cada una de sus caras. Una vez fijado el orden de los cubos por su numeración, la elección de las caras permite construir un cuento. La obra pone así a nuestra disposición un total de 6^9 = 10.077.696 historias.

gunta para el lector: ¿es la potencialidad de este texto mayor que todo lo que ha escrito la humanidad hasta hoy?

En novela tampoco faltan ejemplos. El más conocido es, sin duda, *Rayuela*, de Julio Cortázar, que nos invita a que la leamos de dos maneras: de modo lineal, o comenzando por el capítulo 73 y siguiendo después un tortuoso orden. Otros ejemplos son *Juego de cartas*, de Max Aub, *El castillo de destinos cruzados*, de Italo Calvino, o *Larva*, de Julián Ríos.

El escritor francés Marc Saporta, representante del *Nouveau Roman*, publicó en 1962, un año antes de la aparición de *Rayuela*, la novela combinatoria por excelencia: *Composition No. 1*. El libro, que se presenta con sus páginas sin encuadernar y sin numerar, invita al lector a barajarlas como si fueran naipes y a leerlas en cualquier orden. Gracias a la editorial Capitán Swing, desde 2012 disponemos de una traducción al español.

Las restricciones a las que se someten los autores pueden ser de lo más variopintas. Así ocurre con *La disparition*, la famosa novela-lipograma de Georges Perec: más de 300 páginas sin la letra *e*, la más frecuente en francés. O el poema *Cadaeic cadenza*, compuesto en 1996 por Mike Keith, cuyas 3835 palabras tienen el tamaño en letras de los sucesivos dígitos de π.

Por lo demás, Oulipo sigue vivo y coleando (oulipo.net) como parte de Ouxpo, donde la x equivale a «li», en referencia a la literatura. La letra x puede simbolizar un arte o un género. Así, en Oulipopo (poco acertado en castellano) significa «literatura policíaca» y, en Oucipo, «cine».

Combinatoria musical

¿Se ha hecho algo parecido en música? En cierto modo, algo así consiguen los poemas proteicos de Harsdörffer y los sonetos de Queneau al mantener la rima (la musicalidad) bajo transformaciones combinatorias. En el ámbito estrictamente musical, Mozart alcanzó la genialidad también en la creación combinatoria con su *Musikalisches Würfelspiel*, o «juego de dados musical». ¿En qué consistía la idea?

Un minueto cuenta con 16 compases, por lo que Mozart escribió 16 grupos de 11 compases; es decir, un total de 176. Para elegir el primero de los 16 que formarán un minueto, se elige al azar uno de los compases del primer grupo lanzando dos dados. La suma de puntos en el lanzamiento de dos dados abarca 11 posibilidades (de 2 a 12), por lo que el resultado nos dicta qué compás de los 11 posibles del primer grupo escogeremos. Para elegir el siguiente, se repite el proceso con el segundo grupo, lo que nos concede un total de $11^2 = 121$ posibilidades. Si escogemos del mismo modo los 16 compases, tendremos a nuestra disposición la escalofriante cantidad de $11^{16} \approx 4{,}6 \cdot 10^{16}$ minuetos posibles. Si cada uno durase 30 segundos, necesitaríamos unos 1500 millones de años para escucharlos todos.

La idea original no fue de Mozart. El primer *Musikalisches Würfelspiel* fue escrito en 1757 por Johann Philipp Kirnberger, e incluso Carl P. E. Bach y Joseph Haydn compusieron los suyos.

En todo caso, si hemos de elegir un campeón en música combinatoria, el premio se lo lleva, sin duda, John Cage. Resulta imposible abarcar su obra, por lo que nos limitaremos a citar su *Williams mix*, de 1952 (música a partir de la recombinación aleatoria de pequeños trozos de una cinta electromagnética grabada con anterioridad); la colaboración con Lejaren Hiller que en 1969 dio como resultado la pieza de ordenador *HPSCHD*, reminiscente del juego de dados de Mozart; o *Europeras 1&2*, que usaba fragmentos de óperas europeas famosas de los últimos 200 años.

Para cerrar el círculo que comenzamos con la computadora Mark V y el lamaísmo tibetano, acabaremos con una reciente aplicación para teléfonos inteligentes del cantautor Jorge Drexler. Llamada *n*, consta de tres piezas de música combinatoria que el mismo Drexler reconoce como herederas del juego de dados de Mozart y la poesía de Queneau.

La primera canción, *Habitación 316*, nos permite escoger entre varios estribillos y estrofas a medida que la pieza se va ejecutando. Con la posibilidad de elegir orquestación o solo acompañamiento de guitarra, Drexler nos asegura que dispondremos de $2{,}9 \cdot 10^{27}$ posibilidades, una enormidad incluso en comparación con los dados musicales de Mozart.

La segunda composición, grabada con la Orquesta Sinfónica de Euskadi, se titula *Madera de deriva* y en ella se juega con la geolocalización del usuario: la activación de ciertas secciones de la orquesta depende del camino físico que el oyente decida escoger.

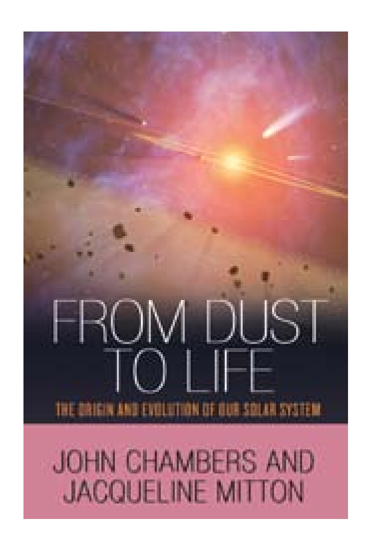
La tercera, *Décima a la décima*, posee una estructura típica del Barroco español, la décima espinela: diez versos octosílabos con cierto patrón de rimas complejo. Tras escribir 10 espinelas, Drexler canta una de ellas y asigna las 9 restantes a otros tantos artistas colaboradores. Al igual que en el poemario de Queneau, el oyente puede escoger, al mismo tiempo que escucha, cuál de los 10 ejecutantes cantará el siguiente verso. Hay un añadido cuyos detalles les dejo que descubran: si *Madera de deriva* variaba con respecto al espacio, *Décima a la décima* lo hace en tiempo.

A algunos de mis amigos artistas y escritores todo esto les parecen juegos de destreza sin más interés que el «más difícil todavía». Pero ¿no es a veces la obra de arte un descubrimiento tras una búsqueda heurística y azarosa en un espacio restringido de combinaciones? En *Bâtons, chiffres et lettres*, Queneau resume magistralmente el propósito de hacer explícitas todas las reglas inherentes al proceso creativo: «El clásico que escribe su tragedia observando cierto número de reglas que conoce es más libre que el poeta que, escribiendo lo que se le pasa por la cabeza, es esclavo de otras reglas que ignora».

PARA SABER MÁS

***Ars combinatoria:* Mystical systems, procedural art, and the computer.** Janet Zweig en *Art Journal*, vol. 56, n.º 3, 1997.

CORTESÍA DEL AUTOR



FROM DUST TO LIFE. THE ORIGIN AND EVOLUTION OF OUR SOLAR SYSTEM

Por John Chambers y Jacqueline Mitton. Princeton University Press; Princeton, 2014.

Sistema solar

Origen y evolución de nuestro mundo entorno

El origen del sistema solar constituye uno de los temas de investigación más vivos y apasionantes de la astronomía. Pero faltaba un cuadro sistemático del estado de nuestros conocimientos, laguna que se ha colmado con creces en el libro de cabecera, modelo de claridad y rigor expositivo. La importancia del desentrañamiento del origen y evolución de nuestro sistema solar trasciende el mero interés disciplinar, pues en él se confía para resolver la cuestión sobre el origen de la vida y, por ende, del observador humano.

Todos los objetos que integran nuestro sistema solar surgieron de unos procesos comunes hace miles de millones de años. Un universo en evolución estableció el marco general para la aparición de una nebulosa de gas y polvo que acunó en torno al Sol una pléyade de planetas (rocosos unos, gaseosos otros), cometas, lunas y asteroides. En uno de los rocosos, la Tierra, convergieron factores necesarios para el advenimiento y desarrollo de la vida.

El sistema solar está dominado por una estrella que contiene más del 99,8 por ciento de la masa del sistema. El Sol posee un diámetro de 1,4 millones de kilómetros. Es, pues, una estrella común, si bien brilla más, y posee más masa, que el 90 por ciento de las que tachonan nuestra galaxia. Se halla ahora a medio camino de su esperanza de vida, unos 10.000 millones de años. Carece de la variabilidad, composición insólita o excesivo campo magnético que caracterizan a algunas de sus contrapartidas estelares más exóticas. El Sol ocupa el centro del sistema, mientras que el resto de los cuerpos gira en su entorno.

La densidad media del Sol es similar a la del agua. Consta, en un 98 por ciento, de hidrógeno y helio, apretadamente comprimidos por la gravedad solar. Lo mismo que otras estrellas, el Sol es un plasma, un gas dotado de carga eléctrica, cuyo interior alcanza temperaturas de millones de grados. Las reacciones nucleares desarrolladas en su núcleo aportan una fuente continua de energía, lo que explica el brillo inextinguible y su liberación de calor para la Tierra y otros planetas. En razón de su masa imponente, la gravitación solar domina el movimiento de todos los demás miembros del sistema. El Sol da cuenta del 2 por ciento del momento angular del sistema solar, o inercia rotacional. Gira bastante despacio; en cada rotación invierte un mes. Debido a la naturaleza fluida de la estrella, las diversas capas de su interior giran a distinta velocidad.

Al Sol rodean ocho planetas mayores, que dibujan órbitas elípticas alrededor del mismo. Proceden todas en idéntico sentido, antihorario, cuando las observamos desde las alturas del polo norte solar. Órbitas que ocupan casi, aunque no exactamente, el mismo plano. Las órbitas se acercan a la circularidad, con la excepción de Mercurio y Marte, que siguen órbitas más elongadas, excéntricas. La excentricidad de Marte constituyó una clave importante para explicar el movimiento de los planetas. Los cuerpos astronómicos pueden agruparse en razón de su forma (esféricos o irregulares), composición (rocosos o helados), apariencia ante el telescopio (borrosos o puntos de luz) y naturaleza de sus órbitas. En el caso de los planetas, el tamaño constituye el factor principal.

En astronomía solar se utiliza como medida de distancia la unidad astronómica (UA), que es la distancia media entre la Tierra y el Sol, unos 150 millones de kilómetros. Distinguimos entre planetas interiores, cuya órbita se halla a menos de 2 UA del Sol, y planetas exteriores, de órbitas situadas entre 5 y 30 UA del Sol. Los planetas interiores, pequeños, reciben el apelativo de terrestres porque presentan una superficie sólida y su estructura y composición semejan las de la Tierra. Los exteriores, carentes de superficie sólida, son gigantes en comparación con los terrestres, y constituidos por múltiples capas de gas y líquido. Júpiter, el mayor, presenta una masa 300 veces mayor que la Tierra.

Los planetas gigantes se acompañan de sistemas de anillos y familias de satélites. Abundan en agua helada y polvo los anillos espectaculares de Saturno; más obscuros y menores, los que ciñen a Júpiter, Urano y Neptuno. Los astrónomos han descubierto ya 168 lunas en órbita alrededor de los cuatro planetas gigantes; cabe esperar que aparezcan otras en el futuro. En cambio, los planetas interiores poseen solo tres satélites; a saber: la Luna terrestre y Fobos y Deimos, par de acompañantes de Marte. Ningún planeta terrestre está rodeado de anillos.

Entre los planetas gigantes y los terrestres se interpone un cinturón de asteroides, en su mayoría concentrados entre 2.1 y 3.3 UA del Sol. Cada mes se descubren centenares de ellos. Suelen ser elongados o de morfología irregular. Pese a su número ingente, no suman una masa total reseñable. Los cometas presentan un aspecto parecido a los asteroides, si bien poseen abundante cantidad de hielo y polvo rocoso. La mayoría siguen órbitas elongadas; llegan al sistema solar interior desde allende Neptuno y perfilan una trayectoria de retorno. De las colisiones entre asteroides resultan meteoroides, fragmentos rocosos que orbitan alrededor del Sol como un planeta en miniatura. Cuando chocan con la Tierra hablamos de meteoritos.

Se conocen dos tipos de meteoritos. Fáciles de reconocer los de hierro, por ser el metal predominante, contienen también níquel y pequeñas cantidades de oro, platino y otros metales raros. Pero la mayoría son rocosos, en particular silicatos. Unos y otros proceden en buena medida del cinturón de asteroides; pero algunos especímenes muy valiosos arrancan de lugares más próximos. Se han contado unos 150 que presentan idéntica composición que las rocas traídas de la Luna. También revisten interés los meteoritos marcianos, ya que son muestras de otro planeta. El Sol presenta una composición semejante a las condritas (los meteoritos más primitivos, que proceden de asteroides).

Las misiones espaciales han sobrevolado allende los planetas mayores del sistema solar. Han cartografiado y estudiado Venus, Marte y la Luna con gran detalle, así como Júpiter y Saturno y sus sistemas de lunas y anillos. La sonda *Messenger* entró en órbita alrededor de Mercurio en 2011 para una inspección cercana del planeta más próximo al Sol. Sobre Venus, Marte y Titán, luna de Saturno, han aterrizado sondas robóticas, que han enviado imágenes y datos a la Tierra. Los astronautas trajeron muestras de la Luna. La sonda *New Horizons* se halla en camino hacia el cinturón de Kuiper; pasará próxima a Plutón en 2015. Esas misiones espaciales sumadas a las observaciones del Telescopio Espacial Hubble y una nueva generación de telescopios instalados en tierra han permitido comparar entre distintos mundos planetarios y abordar sus procesos de formación.

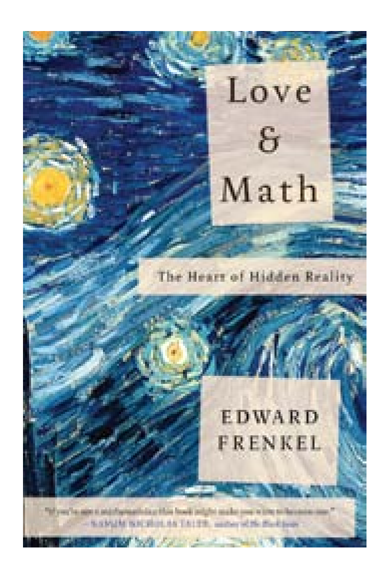
Los capacitados para esas tareas, los humanos, deben su existencia a la rica variedad de elementos químicos que existen en el universo. Nuestro sistema solar contiene hidrógeno (energía que alimenta al Sol), hierro y silicio para construir planetas rocosos, y carbono, nitrógeno y oxígeno para construir bloques de vida. En cuantía variable se dan naturalmente otros 100 elementos. Unos abundan por doquier (hidrógeno, oxígeno y hierro). Otros escasean más (oro, plata y uranio). La mezcla de elementos ha persistido casi constante desde el principio. A su vez, la composición del sistema solar vino condicionada por sucesos ocurridos en otros sitios del universo y que se remontan al estallido inicial (*big bang*).

En su infancia, el universo era muy diferente de lo que es hoy. No había ni galaxias, ni estrellas, ni planetas, ni asteroides, ni siquiera átomos. Al poco de la gran explosión inicial se había convertido en una nube agitada de partículas subatómicas: protones (dotados de carga positiva), electrones (con carga negativa) y neutrones (neutros). Las partículas viajaban a velocidades elevadísimas, colisionando una y otra vez. Los fotones (radiación electromagnética) aparecían y desaparecían generados por unas partículas subatómicas y absorbidos por otras. El propio universo se estaba transformando, expandiéndose y enfriándose con celeridad. En el primer segundo se establecieron las proporciones. Los neutrones, al ser más pesados que los protones y menos estables, se produjeron a un ritmo menor; muy pronto, un neutrón por cada siete protones. Electrones y protones, dotados de cargas opuestas, se formaron en número igual, de suerte que el universo, en su globalidad, resultó eléctricamente neutro.

Cuando la temperatura cayó algo, protones y neutrones colisionantes comenzaron a fusionarse, atraídos por fuerzas nucleares fuertes. Esos agregados y los protones excedentes se convertirían en núcleos de átomos. Los electrones, mucho más ligeros que protones y neutrones, se movían a velocidades elevadísimas, excesivas para interaccionar con otras partículas más pesadas. Los primeros núcleos formados se disociarían de inmediato cuando colisionaran con un fotón energético. Los núcleos surgirían y se desvanecerían en vertiginosa cadencia, retornando a la nube de protones y neutrones que los envolvía. Pasados unos tres minutos, el universo se habría enfriado hasta el punto de que los fotones no resultaran ya tan poderosos como para disgregar los núcleos, y estos empezaron a crecer. En un comienzo, protones y neutrones se combinaban para formar deuterones, núcleos de dos partículas que constaban de protón y neutrón. Absorbían más protones y neutrones para generar núcleos mayores.

La combinación de dos protones y dos neutrones en núcleo de helio-4 (partícula alfa) es muy estable. La adición de otro protón a una partícula alfa produce un núcleo inestable. Lo mismo acontece cuando se funden dos partículas alfa. Transcurridos 400.000 años, el universo se había enfriado; la temperatura era de unos miles de grados. En esa condición, los núcleos, dotados de carga positiva, pudieron asociarse a electrones, dotados de carga negativa, en disposiciones neutras. Así surgieron los primeros átomos. Los átomos con un protón constituirían el hidrógeno, deuterones incluidos, que pasaron a ser deuterio, o hidrógeno pesado. Los átomos con dos protones, partículas alfa incluidas, devinieron helio; los átomos con tres protones, litio. En ese universo joven solo había tres elementos: hidrógeno, helio y litio. Ese universo primitivo no contenía hierro ni silicio que se exigen en la formación de planetas, ni nitrógeno ni carbono requeridos para formar organismos, ni oxígeno necesario para la respiración animal. La formación de todos esos elementos tendría que esperar al nacimiento de las estrellas.

—Luis Alonso



LOVE AND MATH: THE HEART OF HIDDEN REALITY

Por Edward Frenkel. Basic Books; Nueva York, 2013.

El programa de Langlands

Y su importancia para la física

«Profesor Weil: Como respuesta a su invitación para dar una charla, le adjunto la siguiente carta. Tras escribirla me he dado cuenta de que difícilmente contiene una sola afirmación de la que esté seguro. Si la lee como pura especulación le estaré agradecido; si no es así, estoy convencido de que tiene una papelera a mano.»

Con estas líneas comenzó el matemático Robert Langlands, en aquel entonces en su treintena, una carta al reconocido André Weil. Estaba llena de especulaciones para relacionar áreas de las matemáticas que hasta entonces se creían independientes. El documento se considera el origen de las conjeturas de Langlands. El libro que nos ocupa es un intento por parte del

matemático Edward Frenkel de explicar, en términos accesibles para el no experto, en qué consiste el programa de Langlands y sus ramificaciones en geometría y física. El programa de Langlands corresponde a una red de conjeturas de las cuales algunas se han demostrado, mientras que otras siguen sin resolver. A día de hoy constituyen un área vasta y muy actual de investigación en matemáticas.

El objetivo del libro es muy ambicioso, ya que el autor pretende contarnos los avances que suceden en la frontera de la física matemática. En concreto, se cree que la red de conjeturas de Langlands en su versión geométrica tiene una relación profunda con unos resultados que los físicos conocen desde hace tiempo: que ciertas teorías cuánticas en apariencia distintas son equivalentes (suele decirse que son «duales»). El lector se embarcará en un viaje de apenas 250 páginas pero que le llevará por una diversidad de mundos. El recorrido empieza con una explicación del programa de Langlands en su versión clásica: una conexión entre la teoría de números (representaciones de ciertos grupos de Galois) y una generalización de las conocidas funciones trigonométricas (formas automórficas). Las ideas se explican con un caso particular como ejemplo, cuya motivación es nada más y nada menos que el famoso último teorema de Fermat.

El libro continúa mostrándonos el modo en que la función que desempeñan los grupos de Galois en las conjeturas de Langlands puede sustituirse por lo que se llama grupo fundamental de una superficie. De esta forma, las conjeturas de Langlands relacionan el análisis armónico (esa generalización de las funciones trigonométricas), no con la teoría de números, sino con la geometría de superficies. Es esta versión geométrica del programa de Langlands la que guarda una relación más directa con la teoría cuántica de campos y con la teoría de cuerdas.

Las teorías cuánticas describen las interacciones entre partículas; la teoría cuántica de las interacciones fuertes (cromodinámica cuántica) nos dice cómo interaccionan quarks y gluones para formar partículas compuestas como los protones y neutrones, que, a su vez, componen los núcleos atómicos. Distintas teorías describen las interacciones de partículas diferentes, pero a veces sucede que dos teorías en apariencia distintas son en realidad equivalentes. ¿Cómo es esto posible, si estas no hablan de las mismas partículas? La clave reside en que la interacción de partículas fundamentales de una de las teorías es equivalente a las interacciones entre partículas compuestas en la otra, y viceversa.

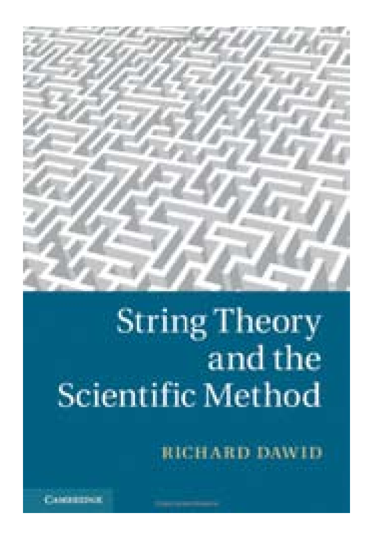
Normalmente decimos que las teorías son «duales». Estas dualidades resultan muy iluminadoras, porque aunque hay varios métodos para calcular las interacciones de partículas fundamentales, las interacciones de partículas compuestas son mucho más difíciles de determinar. Gracias a la dualidad podemos calcular esas propiedades con las herramientas válidas para las interacciones de las partículas fundamentales, solo que tenemos que hacer los cálculos en la teoría dual. El programa de Langlands parece cumplir una función a la hora de decidir cuál es la teoría dual de otra.

Como el lector comprobará, la red de conjeturas de Langlands toca casi todos los aspectos de las matemáticas. Desde la teoría de números o el cálculo a la geometría y la topología. De hecho, a veces se la conoce como la gran teoría unificada de las matemáticas. El que el libro quiera explicar las conexiones con la física teórica no facilita precisamente la tarea de la divulgación. Pero hay que admitir que el autor hace un trabajo excelente. Sin asumir ningún conocimiento técnico en particular, explica, con ejemplos muy bien elegidos, un concepto matemático tras otro: la aritmética modular, grupos de Galois y sus representaciones, curvas elípticas, números complejos, geometría riemanniana, etcétera. Permite hacerse una idea de qué son estos conceptos y para qué los usan los matemáticos. Además, incluye un buen surtido de notas adicionales que amplían la explicación con ejemplos concretos, sugieren lecturas adicionales o aclaran las afirmaciones más complejas del texto principal. Este anexo constituye una parte importante del libro; desde luego, el lector que quiera

ahondar en algunos de los temas tratados las encontrará útiles. Sin embargo, es justo decir que algunas partes del libro, en especial los últimos capítulos, pueden resultar complicados para el lector que no esté familiarizado con las matemáticas.

Pero este libro es algo más que un libro sobre el programa de Langlands. Es una obra muy personal en la que el autor escribe sobre los distintos temas científicos usando su propia vida como hilo conductor. De esta forma, tiene también algo de autobiografía, una historia en la que Frenkel persigue su sueño de convertirse en matemático y hacer matemáticas, enfrentándose a todo tipo de dificultades. Muchos de los personajes que le ayudan a alcanzar sus metas son a su vez brillantes matemáticos, de los que puede que el lector haya oído hablar. La actitud de total compromiso con los sueños, muy alejada de las prosaicas metas y objetivos que llenan nuestro mundo de hoy, está presente en este libro en cada página y en cada personaje. Ello hace que si el lector se pierde en algún detalle técnico —como es posible que suceda—, el libro siga despertando interés y la lectura siga siendo entretenida. Es muy bonito leer una historia en la que esta forma de entender la vida triunfa.

—Alberto Ramos Martínez
Centro de Sincrotrón Alemán (DESY)



STRING THEORY AND THE SCIENTIFIC METHOD

Por Richard Dawid. Cambridge University Press; Cambridge, 2013.

Teoría de cuerdas

Paradigma del método científico

Todas las disciplinas se esfuerzan por imitar los métodos de la física teórica para adquirir lo que se entiende por el paradigma del método científico. Junto a ello, está muy extendida la idea de que la confirmación experimental constituye el camino para que una teoría científica adquiera estatuto de conocimiento científico genuino. De acuerdo con el esquema hipotético-deductivo dominante, los científicos especulan sobre una nueva teoría que se propone como hipótesis de la que se infieren determinadas predicciones. Si lo predicho se confirma con lo observado o experimentado, entonces la hipótesis resulta fiable. Por eso puede resultarles chocante a algunos científicos que determinados físicos teóricos se empeñen ahora en procurar un cambio en lo que se considera que se requiere para que una teoría sea considerada científica, cambio que exonera de la exigencia de confirmación experimental de teorías científicas.

La teoría de cuerdas ha desempeñado un papel destacado en la física teórica de los últimos tres decenios y ha transformado por entero nuestra interpretación de los principios fundamentales de la construcción del universo. De acuerdo con sus postulados básicos, existen entidades bidimensionales (cuerdas) que vibran en un espaciotiempo de diez u once dimensiones y que, lejos de ser puntuales, presentan una extensión finita. Vibraciones de espaciotiempo que deberían, en principio, dar origen a las partículas. Con otras palabras, las partículas puntuales serían, en realidad, estados vibracionales de un objeto extendido al que llamamos cuerda o filamento. Así, pues, se supone que la teoría de cuerdas constituye la teoría definitiva de física fundamental, unificadora de todas las fuerzas fundamentales en una, capaz de justificar la existencia de todas las partículas fundamentales como vibraciones de objetos bidimensionales en un espaciotiempo pluridimensional. En potencia, la teoría de cuerdas predice todos los resultados de la física fundamental estándar. Sin embargo, no parece vislumbrarse en el horizonte que pueda someterse a confirmación experimental. Y cabe esperar que permanezca así en un futuro previsible. Ahora bien, una vez se pierde la conexión entre argumentación teórica y ensayo experimental, ¿cómo no temer que el progreso científico avance a ciegas hasta detenerse? Nos encontramos con el reto de un aspecto inédito del proceso científico que ha sido olvidado por los filósofos de la ciencia.

Ante tal situación, ¿qué es lo que alimenta en los expertos tan sólida fe en su teoría? *String theory and the scientific method* articula una respuesta coherente al detallar la naturaleza de los enunciados nucleares de la teoría de cuerdas. El autor no carece de méritos para su empeño: posee experiencia en física de altas energías y en filosofía. Sostiene que la teoría de cuerdas constituye el ejemplo más conspicuo de diversas teorías que se postulan en física de altas energías y no reciben respaldo experimental.

No se trata de un modelo sencillo, cierto. Su complejo aparato matemático impide alcanzar soluciones realistas y las energías involucradas en la comprobación experimental de la mayoría de las versiones de la teoría trascienden de lejos las energías más altas de los aceleradores de partículas. Además, si fuera cierta la teoría de cuerdas, capaz de explicarlo todo, no podría ser refutada por ningún experimento físico local. En 2006, Lee Smolin escribía ya, en *The trouble with physics: The rise of string theory, the fall of a science, and what comes next*, que la teoría había fracasado a la hora de formular predicciones que pudieran someterse a prueba empírica y que algunos de sus defensores, en vez de admitir ese hecho, se afanaban en cambiar las reglas para librarse de los tests habituales que suelen imponerse a las ideas científicas. Ese procedimiento pondría en crisis no solo la física, sino la ciencia entera. Si la contrastación experimental que ha sido santo y seña de la ciencia desde Newton hubiera de sustituirse, también habría que cambiar qué entender por ciencia. Richard

Dawid abre, a su vez, una perspectiva muy interesante basada en el principio de subdeterminación.

Recordemos su arranque. La evolución de la física fundamental puede construirse como una serie de unificaciones cuyos comienzos se remontan a Newton y su introducción de la fuerza de la gravitación universal, que aportaba una explicación unificada de fenómenos celestes y fenómenos terrestres. Unos dos siglos más tarde, Maxwell desarrolló una descripción unificada de la electricidad y el magnetismo. En 1905, la einsteiniana teoría especial de la relatividad ideaba un marco coherente para la mecánica clásica y la electrodinámica. Un decenio más tarde, la relatividad general extendía esa nueva perspectiva, haciéndola compatible con el fenómeno de la gravedad. Después de que la mecánica cuántica abriera un nuevo mundo de microfísica regulado por el principio de indeterminación de Heisenberg y la estadística cuántica en los años veinte, la física cuántica se hizo pronto compatible con la relatividad especial mediante la introducción de la teoría cuántica de campos. Decenios más tarde, en los años sesenta y setenta, el modelo estándar de física de partículas avanzó otro paso hacia la unificación: una forma específica de simetrías internas, la simetría de aforo (gauge), aportaba una base para una descripción coherente de las tres fuerzas que se habían descubierto en física nuclear y física de partículas.

El modelo estándar de la física de partículas desarrollaba una explicación convincente y coherente de las interacciones nucleares. Estableció un nuevo marco de interpretación de la microfísica y fue creando un elenco amplio de predicciones empíricas. Su confirmación se suponía cuestión de tiempo. Pero el modelo estándar no solucionaba la necesaria conciliación de la teoría cuántica con la relatividad general. Ese paso habría de corresponderle a la teoría de cuerdas, propuesta en 1974. La idea tuvo en un principio que abrirse paso en medio de enormes dificultades conceptuales. En 1984, Green y Schwarz obtuvieron un lagrangiano coherente de una cuerda cuántica que incluía campos de materia (supercuerdas). Desde entonces, representa la esperanza más firme de teoría universal de todas las interacciones conocidas.

El espectro de objetos físicos en teoría de cuerdas se amplió. Además de los objetos unidimensionales que se postularon en un comienzo, se fue requiriendo la introducción adicional de una amplia gama de objetos de diversas dimensiones. Esos objetos se denominan D-branas: un número añadido puede denotar el número de dimensiones espaciales. La teoría de cuerdas constituye ahora una red compleja de razonamiento en la que intervienen elementos de análisis matemático riguroso, conjeturas generales que se fundan sobre razonamientos de determinados casos limitantes, modelización que se realiza en marcos específicos y evaluaciones cuantitativas aproximadas.

Por su parte, el modelo estándar ha recibido confirmación experimental y ha encadenado una secuencia impresionante de éxitos predictivos consistentes. La última predicción del modelo estándar obtuvo confirmación experimental en el verano de 2012 en el Gran Colisionador de Hadrones del CERN. Culminaba una fase importante en la evolución de la física fundamental. El progreso teórico prosiguió más allá del modelo estándar, planteando nuevas teorías de un alcance mucho mayor. Las teorías de gran unificación (GUT, de *grand unified theories*) conjeturan una estructura unificada de interacciones nucleares; la supersimetría (SUSY) propone una estructura de simetría más extensa que conecta partículas de diverso espín; la supergravedad extiende ese concepto a una teoría de la gravedad; la cosmología inflacionista alteró nuestra perspectiva sobre el universo primitivo y promovió el acercamiento del modelo cosmológico y la física de altas energías. Y la teoría de cuerdas, centro conceptual de la física fundamental contemporánea que cementa otras teorías importantes, considerada la opción más potente y ambiciosa de una teoría unificada de todas las interacciones.

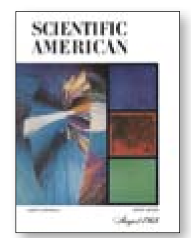
Todas esas teorías, que trascienden el modelo estándar, comparten un mismo problema. Pese a su ya larga existencia, hasta la fecha ninguna ha recibido confirmación experimental. No podemos continuar con la estrategia experimental canónica de someter a contrastación la física de altas energías mediante la construcción de colisionadores de partículas cada vez más potentes, habida cuenta de los ingentes esfuerzos necesarios para elevar los niveles de energía de esas máquinas. El Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN podría muy bien ser el último experimento de ese tipo. Solo la supersimetría, entre las teorías que trascienden el modelo estándar, podría tener alguna opción de obtener confirmación empírica durante los ensayos en el colisionador ginebrino. Las escalas de energía que caracterizan a la teoría de cuerdas son tan altas que no pueden someterse a prueba en ningún colisionador de partículas que podamos construir. Los tests que respaldan la física estándar de partículas no pueden sustanciar la declaración de la teoría de cuerdas sobre la existencia de dimensiones espaciotemporales adicionales, que nos son invisibles en razón de su tamaño mínimo.

Sin embargo, varias características de la física contemporánea de altas energías y la cosmología sugieren un cuadro más optimista. De entrada, el desarrollo teórico registrado tras el advenimiento del modelo estándar ha aportado ideas muy brillantes para ahondar en las posibilidades de una unificación genuina de todas las interacciones conocidas. La física teórica ha dado pasos importantes hacia un objetivo que se viene acariciando desde los tiempos de Newton: la construcción de una teoría física de aplicación universal. Además, no se ha caído en una temida selva de teorías, sino que los físicos parecen converger en una orientación única en la construcción del nivel conceptual más fundamental. Sin apoyatura empírica, pero con plena confianza en las teorías, háblese de teoría de cuerdas o de inflación cósmica. Dawid razona los tipos de criterios que pueden emplearse para la aceptación de una teoría no empírica en ausencia de pruebas directas, e incluso indirectas, de los rasgos nucleares de la teoría. El argumento se apoya en el concepto de límites de la subdeterminación. Una teoría es subdeterminada por los datos si hay varias teorías que pueden explicar esos mismos datos, y hemos de escoger entre ellas.

Para contemplar las posibilidades de una contrastación empírica en el futuro habrá que distinguir entre las características nucleares de la teoría y sus implicaciones para la física a escalas de energía más bajas. Es de esperar que la propiedad nuclear de las cuerdas, su extensividad (*extendedness*), se acerque a la longitud de Planck. En un escenario clásico, eso significa que la extensividad de la cuerda pasa a ser empíricamente contrastable solo a 13 órdenes de magnitud, lo que trasciende las escalas de energía que pueden alcanzarse con el mayor experimento de energía actual, el LHC.

—Luis Alonso

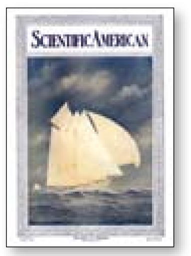
Recopilación de Daniel C. Schlenoff



Agosto 1964

Cristales líquidos

«Pese a que su existencia se conocía desde hace más de 70 años, hasta hace muy poco las sustancias que exhiben una fase líquido-cristalina se consideraban más una curiosidad de laboratorio que objetos de estudio potencialmente útiles o teóricamente importantes. Pero en los últimos años, varios investigadores de EE.UU. y otros países han retomado la investigación de la fase líquido-cristalina. Los primeros resultados de los nuevos estudios han contribuido a aclarar la insólita arquitectura molecular de los cristales líquidos. Insinúan asimismo algunas aplicaciones posibles a consecuencia del notorio hecho de que estas sustancias reaccionan y cambian de color ante minúsculas fluctuaciones de temperatura, esfuerzo mecánico, radiación electromagnética y entorno químico.»



Agosto 1914

La Gran Guerra

«Jamás desde que empezaron las guerras hubo un pueblo militar de esa importancia, con una confianza tan absoluta en su invencibilidad, que haya arriesgado tanto como ahora lo hacen los ejércitos alemanes combatiendo en tierra y mar. De vencer los teutones, estos someterán a toda Europa a su dictado y las banderas de sus barcos de guerra y mercantes ondearán sin oposición por los siete mares, sin que nada se interponga entre ellos y el dominio mundial salvo la gran república anglohablante del Nuevo Mundo. Si Alemania hubiera mostrado un espíritu menos implacable al abalanzarse contra el resto de Europa con una desafiante osadía rayana en el desprecio, podría esperar, en caso de desastre, unas condiciones razonables en la rendición de cuentas. Pero, así las cosas, si Europa vence se cobrará un gravoso peaje.»

Remiendos capilares

«Según se afirma, el método de implante capilar del doctor Szekely, de Budapest, da muy buenos resultados. Un alambre de oro de 0,05 milímetros de diámetro, casi invisible a simple vista, plegado en forma de bucle se enhebra con un cabello femenino, del color deseado, de 20 a 30 centímetros de largo. El alambre se introduce en una aguja hipodérmica Pravaz corta y fina, y entonces se dobla y corta formando un gancho. La aguja se inserta normalmente, se gira y se retira con cuidado. El cabello así plegado queda anclado en el tejido subcutáneo. Para una cabeza totalmente calva podrían necesitarse hasta 50.000 cabellos (*ilustración*). Incluso en tal caso, haría falta solo del orden de un gramo de oro.»

Superconductividad

«Al estudiar la resistencia de los metales a las temperaturas que se obtienen con helio líquido, preví que la resistencia del mercurio sería aún más fácil de medir a los 4,25 grados kelvin, y que disminuiría hasta hacerse despreciable a los 2 grados kelvin (–271 grados centígrados). Los experimentos han respaldado esta predicción por lo que respecta a las bajas temperaturas, pero también han puesto de manifiesto el hecho de que la desaparición de la resistencia es súbita. El mercurio a la temperatura de descenso, conocida como temperatura crítica (4,19 grados kelvin), pasa bruscamente a un estado nuevo, caracterizado por una extrema movilidad de la electricidad. Esa situación, en que es posible mantener una corriente sin una fuerza electromotriz apreciable, bien podría calificarse de estado de superconductividad.

—H. Kamerlingh Onnes»



Agosto 1864

Hormigas de California

«No hay palabras para describir las molestias que este año causan las hormigas, esos enemigos de las provisiones atesoradas por las amas de casa californianas. En los distritos más cálidos del estado, no es posible almacenar nada comestible sin atraer miríadas de ellas, y los daños que causan son realmente importantes. Nunca como en 1864, en lo que alcanzan los recuerdos de los colonos más ancianos, han sido tan numerosas en las cotas más bajas de Sacramento y San Joaquín. Y en las minas los residentes informan de que ejércitos de ellas invaden despensas, cocinas y armarios. Los mineros sostienen que están acumulando reservas anticipadas de comestibles para hacer frente a un largo y crudo invierno.»



DISIMULAR LA CALVICIE: Implante de cabello con raíces de hilo de oro, Hungría, 1914.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CXI, N.º 5, 1 DE AGOSTO DE 1914

ASTROFÍSICA

Las burbujas gigantes de la Vía Láctea

Douglas Finkbeiner, Meng Su y Dmitry Malyshev

Se han descubierto unos lóbulos que se extienden decenas de miles de años luz por encima y por debajo del disco de la Vía Láctea. Su origen sigue siendo un misterio.



COMPUTACIÓN

Percepción extrasensorial

Gershon Dublon y Joseph A. Paradiso

Cómo cambiará nuestra forma de ver, oír, pensar y vivir, un mundo repleto de sensores.

SOSTENIBILIDAD

Reutilización de aguas residuales

Olive Heffernan

Las aguas residuales tratadas podrían convertirse en la fuente más segura y sostenible de agua corriente, si se vence el rechazo social.



ARQUEOLOGÍA

Dioses de sangre y piedra

Erik Vance

Envuelta en misterio durante largo tiempo, la antigua cultura de Teotihuacán por fin desvela sus secretos.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Carlo Ferri
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

SENIOR VICEPRESIDENT AND EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
MANAGING EDITOR, ONLINE Philip M. Yam
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Seth Fletcher, Christine Gorman, Michael Moyer, Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Jason Mischka
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
VICE PRESIDENT AND ASSOCIATE PUBLISHER, MARKETING AND BUSINESS DEVELOPMENT Michael Voss

DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
NEW PLANNING
Javier Díaz Seco
Tel. 607 941 341
jdiazseco@newplanning.es

Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	65,00 €	100,00 €
Dos años	120,00 €	190,00 €

Ejemplares sueltos: 6,50 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Jacobo Chamorro: *Psicobiología de los hábitos*; Víctor Parro García: *Nuevas técnicas para buscar vida en Marte*; Andrés Martínez: *Apuntes, Genética de la resistencia microbiana e Inmigración y riqueza*; José Manuel Vidal Donet: *Detector de patógenos*; Xavier Roqué: *El encaje de las placas tectónicas*; Olivia Potel: *La reproducibilidad en biología*; Fabio Teixidó: *Invocar la lluvia, Cuasicristales extraterrestres y Erosión por enfriamiento*; Bartolo Luque: *La economía de Ponzi*; Alberto Ramos: *El oráculo de Ramanujan*; Juan Pedro Campos: *Apuntes*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN 0210136X Dep. legal: B-38.999-76

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. N-II, km 600
08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España